

APUNTES DE TECNOLOGIA  
DE FABRICACION DE CIRCUITOS INTEGRADOS  
MONOLITICOS, DE CAPA FINA Y DE CAPA GRUESA

J.A. MARTIN PEREDA  
M. A. SIMON LANGARICA .  
C. LLANOS GARCES

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACION  
DE MADRID

Los presentes apuntes solo tienen como fin el de agrupar los diferentes los diferentes aspectos tratados en las clases teóricas y completar algunos puntos que no fueron allí detallados suficientemente. No tratamos de dar una información completa de la Tecnología de Fabricación de Circuitos Integrados Monolíticos, ya que ello exigiría mucho mas espacio del que aquí se le puede destinar.

Forzosamente, como es casi obligado en unos apuntes rápidos como los presentes, se encontrarán defectos de estructura y forma que en el futuro tratarán de ser enmendados.

Para su confección nos hemos basado en la siguiente Bibliografía, que el alumno podrá consultar para una recomendada ampliación:

- BURGER & DONOVAN: "Fundamentals of Silicon Integrated Device Technology". Prentice-Hall. N.Y. 1967
- A.S.GROVE: "Physics and Technology of Semiconductor Devices". Wiley. N.Y. 1967
- "INTEGRATED CIRCUITS: DESIGN PRINCIPLES AND FABRICATION" Motorola Semiconductor Products Div. Engineering Staff. McGraw-Hill N.Y. 1965 (Existe edición en francés )
- Diversos números de IEEE SPECTRUM y de los PROCEEDINGS del IEEE.

## 56.1 ESTRUCTURA CRISTALINA DEL SILICIO.

El estudio cristalográfico del silicio desde el punto de vista de su aplicación en la tecnología de dispositivos semiconductores puede dividirse en dos partes. La primera es aquella relacionada únicamente con el silicio puro; esto es, con aquellas estructuras cristalográficas en las que los principales integrantes son átomos de silicio sin que la presencia de un cierto número de impurezas, relativamente pequeño, llegue a alterar su constitución primaria. Son estas estructuras las que darán lugar a los dispositivos básicos de un circuito integrado o de un componente activo discreto.

La segunda, es la que se refiere al silicio no puro sino unido de forma esencial a algún otro elemento, principalmente oxígeno. Sus propiedades quedarán alteradas y darán lugar a propiedades de utilidad en aspectos diferentes a los del silicio puro. Estas propiedades abarcan, desde el simple aislamiento de los componentes a la formación de otro tipo de dispositivos activos entre los que mencionaremos, por ejemplo, a los MOSFET.

Ambas partes merecen especial atención, aunque trataremos únicamente la primera.

### ESTRUCTURA DEL SILICIO PURO

El silicio se encuentra en la IV columna de la tabla periódica y como tal, posee cuatro electrones en su capa externa. Su forma de cristalización es con la estructura del diamante. Las uniones en este tipo de cristal son de electrones compartidos o lo que es igual, de tipo covalente. Por ello puede considerarse que cada uno de los pares de electrones de la capa externa está formado por un electrón de cada uno de los dos átomos unidos. Estos dos electrones relacionados en cada enlace covalente tendrán sus espines con sentidos opuestos. A ello es debido la extrema estabilidad de esta estructura.

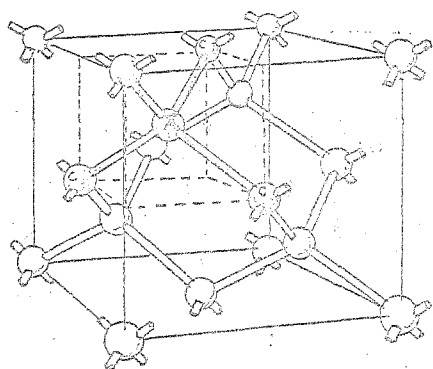


Fig. 56.1

La Fig. 56.1 muestra una parte de una malla de silicio, en la cual se ha detallado un átomo particular de Si, denominado por X, rodeado de cuatro átomos más de Si con los que comparte los electrones. Esto es, hemos representado los enlaces covalentes como varillas conectando directamente a los átomos. Estas cuatro varillas parten del átomo de una forma completamente simétrica en el espacio; así los cuatro átomos contiguos se encuentran en los vértices de un tetraedro. Esta misma relación especial existe para todos los átomos del cristal. La Fig. 56.1 muestra también

que una unidad mayor del cristal es cúbica. De hecho puede mirarse también a la estructura del diamante como un par de mallas cúbicas de caras centradas, que penetran una en otra. Los átomos marcados como C están tan localizados en los centros de las caras que dan hacia el observador. El átomo X está entonces en el vértice de otro cubo centrado en las caras idéntico al cubo grande mostrado.

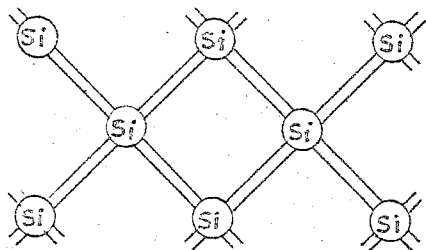


Fig.56.2

Como puede verse en la Fig. 56.2, el cristal del silicio conduce de forma muy fácil a una representación bidimensional. Los pares de electrones - unidos covalentemente pueden mirarse como elementos estructurales conectando a los átomos.

## 56.2 PURIFICACION DE LOS METALES SILICIO Y GERMANIO.

El objeto de esta sección es dar una visión general de las técnicas más comunes en la actualidad para la producción del material base de los dispositivos de silicio y germanio. La discusión que haremos quedará limitada por dos razones. Primero, no daremos énfasis a los procesos que se están desarrollando para producir mejores materiales más económicamente. Segundo, no haremos mención de un gran grupo de semiconductores compuestos, entre los que podríamos citar al arseniuro de galio, que están tomando cada día una mayor importancia, sobre todo el ya mencionado Ga As base de los diodos luminiscentes y los láseres de semiconductor. Su inclusión abriría un abanico de nuevos terrenos en los que no podemos entrar aquí.

Igualmente, no veremos la purificación química del germanio y el silicio ya es práctica común entre los fabricantes de materiales semiconductores para la industria de dispositivos, comprar ya germanio o silicio de "grado electrónico".

Discutiremos aquí las etapas necesarias para alcanzar la deseada pureza final de los materiales que han sido ya purificados por procesos químicos. Las técnicas difieren en detalle dependiendo del material que se considere, pero en todos los casos, el principio básico es el del refinamiento de zona ("zona refining") un proceso inventado por Pfann.

### 56.2a CONSIDERACIONES TEORICAS.

La técnica del refinamiento de zona hace uso del hecho de que en el punto de solidificación, la concentración de equilibrio de una impureza en el sólido difiere de la concentración en el líquido. Este comportamiento se describe convenientemente por la constante de distribución  $K_0$ , que es la razón de la concentración de impurezas en el sólido con la concentración en el líquido, para el equilibrio:

$$K_0 = \frac{\text{concentración en el sólido}}{\text{concentración en el líquido}} = \frac{C_s}{C_l}$$

Consecuentemente,  $K_0$  puede calcularse del diagrama de fase. Para las pequeñas cantidades de impurezas que nos encontramos en este campo,  $K_0$  puede considerarse independiente de la concentración.

Los valores más conocidos de  $K_0$  para varias impurezas en germanio y silicio vienen recogidos en la Tabla 56.1. En ella puede verse que, para la mayor parte de impurezas  $K_0 < 1$ , indicando que las impurezas son más solubles en la fase líquida que en la sólida.



TABLA 56.1

COEFICIENTES DE DISTRIBUCION

IMPUREZA	Ge	Si
Al	0,073	0,002
As	0,02	0,3
B	20	0,85
Bi	$4,5 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-3}$
Ga	0,087	0,0080
Ge	1	0,33
In	$10^{-3}$	$4 \times 10^{-4}$
Li	0,002	0,01
P	0,08	0,35
O	- - -	0,5
Sb	0,003	0,023
Si	5,5	1
Sn	0,020	0,016

Si se solidifica un líquido, la redistribución de impurezas viene descrita por el coeficiente de segregación o distribución  $K$  en lugar de por  $K_0$ . Esto sucede ya que  $K_0 < 1$ , por ejemplo, se formará una capa enriquecida, en la parte alejada del líquido, más adelante de la interfase sólido - líquido, debido al rechazo de impurezas por el sólido. En esta capa las impurezas pueden difundirse únicamente hacia el seno del líquido, debido al flujo laminar en el líquido adyacente -

al sólido. La concentración de impurezas en la interfase  $CLi$  más que la concentración en el seno del líquido  $CLb$  es la que determina la concentración en el sólido que se forma. El coeficiente de distribución  $Cs/CLb$  está más próximo a la unidad que la constante de distribución de equilibrio  $Cs/CLi$ , como puede verse fácilmente en la Fig. 56.3. Es fácil de ver que el coeficiente de distribución será una función de la velocidad de solidificación  $\bar{x}$ , de la constante de difusión de las impurezas en el líquido  $D$ , y de la anchura de capa de difusión  $\delta$ . Burton analizó este problema y

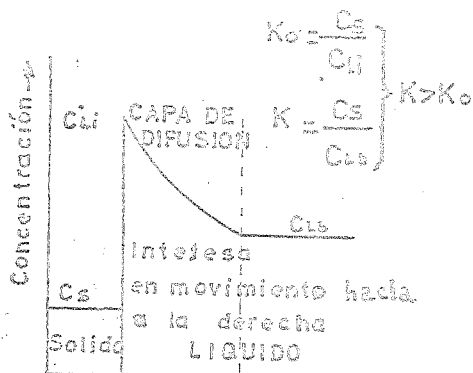


Fig. 56.3

dió la expresión

$$K = \frac{K_0}{K_0 + (1-K_0)e^{-\bar{x}\delta/D}} \quad (56.1)$$

ya que la constante de difusión  $D$  no es conocida en la mayor parte de los casos, y debido al hecho de que anchura de la capa varía con la agitación y posiblemente también con el gradiente de temperatura, el coeficiente de distribución efectivo se determina normalmente de forma experimental para las condiciones requeridas.

De todo ello, en una solidificación normal, una cierta cantidad de material líquido con impurezas se va solidificando desde un extremo. Ya que esta acción rechaza las impurezas al líquido, la concentración de soluto en el líquido, y consecuentemente la del sólido, crece continuamente. Suponiendo una mezcla perfecta en el líquido excepto

en la capa de difusión, la concentración de impurezas en el sólido  $C_s$ , como una función de la fracción  $g$  solidificada, puede expresarse como

$$C_s = K C_{L0} (1-g)^{K-1} \quad (56.2)$$

donde  $C_{L0}$  es la concentración inicial de impurezas en el líquido.

En el refinamiento de zona, una estrecha zona líquida se hace pasar transversalmente a lo largo de la barra que va a ser purificada. Cualitativamente, puede verse que una pasada de zona única es menos efectiva que la solidificación normal, ya que la concentración de impurezas  $C_L$  en el pequeño volumen de la zona líquida aumenta rápidamente debido al rechazo de impurezas por la zona sólida. Tan pronto como  $C_L$  sea igual a  $C_{L0}/K$ , donde  $C_{L0}$  es la concentración de impurezas original de la barra, la zona en movimiento no causa posterior efecto. Para un paso de zona única la concentración  $C_s(x)$  a una distancia  $x$  cualquiera en la barra (excepto para la última zona a solidificar) viene dada por la siguiente relación

$$C_s(x) = C_{L0} (1-(1-k)e^{-Kx/L}) \quad (56.3)$$

donde  $L$  es la longitud de la zona. La segregación en la última zona viene descrita por la ecuación (56.2).

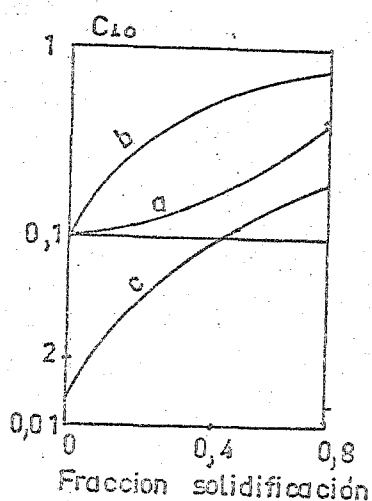


Fig. 56.4

más desplazamiento de impurezas por refinamiento de zona continuado. Una zona estrecha dará, por ello, un gradiente de concentración final más abrupto que una zona ancha, para una velocidad de movimiento de la zona fundida. Para una longitud dada de zona, una velocidad lenta de paso dará un gradiente más abrupto que una rápida debido a que para velocidades altas  $K$  tiende a aproximarse a la unidad. La distribución de impurezas final, que depende de  $K$  y de la relación entre la longitud de la zona y la de la barra, puede ser calculada teóricamente. Los resultados de tales cálculos para algunos valores típicos son los dados en la Fig. 56.5

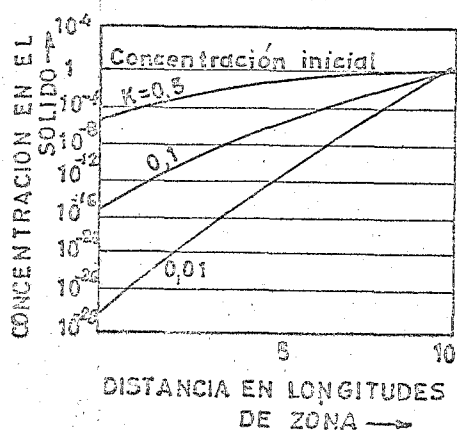


Fig. 56.5

### 56.2.b APLICACIONES.

Durante el proceso de purificación deberá evitarse en lo posible cualquier posible contaminación. Este requerimiento pone un límite al número de diseños prácticos. Las fuentes de contaminación más comunes son el soporte en el que el material se va a purificar, el gas ambiental, y el recipiente en el que esta atmósfera de gas se mantiene.

El material del soporte no deberá reaccionar con el semiconductor, deberá estar libre de impurezas y ser fácil de limpiar. Además, deberá ser posible fabricar el material en la forma deseada. Los materiales que más perfectamente han encontrado uso son grafito y cuarzo de alta pureza.

La atmósfera debería ser inerte al material semiconductor. La tecnología hasta hoy se ha construido en torno a atmósferas con una concentración efectiva de oxígeno de alrededor de 10 ppm. Ello es debido a que su presión total no es tan fácil como parece. Más comúnmente se usan gases inertes con la pureza más alta obtenible, tales como hidrógeno, helio, argón y nitrógeno.

El recipiente en el que se mantiene la atmósfera inerte se construye, usualmente, de cuarzo fundido debido a sus propiedades únicas: pureza, facilidad de limpieza, transparencia, dureza y coeficiente de expansión térmica pequeño.

Intimamente relacionado con el problema de la contaminación está la elección del método de calentamiento. El más usado suele ser el de calentamiento por RF, debido a sus muchas ventajas entre las que citaremos: (1) separación entre la fuente de calor y el objeto de calentamiento que simplifica los problemas de contaminación (2) posibilidad de gradientes de temperatura más abruptos (3) mayor vida para el tubo de cuarzo (4) buena visibilidad.

### 56.2.c REFINAMIENTO DE ZONA DEL GERMANIO.

En el laboratorio y en procesos industriales, las barras de germanio se refinan casi exclusivamente en horquillas de grafito de gran pureza bajo atmósfera protectora de gases inertes purificados como hidrógeno, helio, argón o nitrógeno contenidos en un tubo de silice.

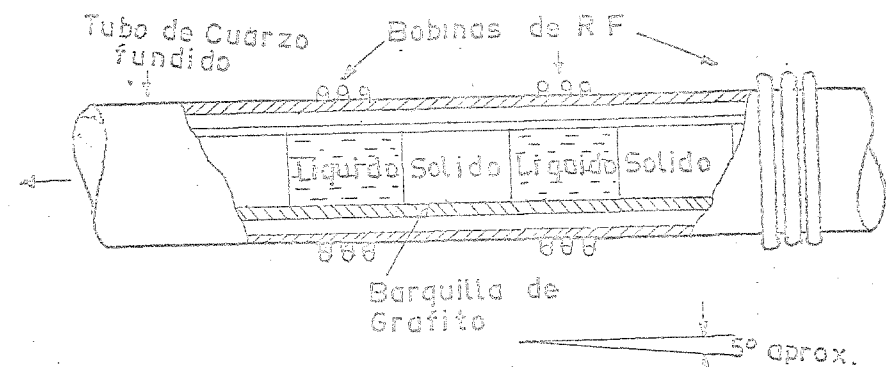


Fig. 56.6

Fig. 56.6 La velocidad normal suele ser de unos 4 mm/min.

### 56.2.d REFINAMIENTO DE ZONA DEL SILICIO.

Las condiciones del germanio no se repiten con el silicio. Tres de las impurezas más comunes en el silicio son fósforo, boro y arsénico que tienen constantes de distribución muy próximos a la unidad. Esto hace su regresión muy inefectiva. Además el silicio líquido reacciona

quimicamente con todos los materiales de crisoles conocidos. Afortunadamente, la velocidad de reacción del silicio con la sílice es relativamente pequeña aún para las altas temperaturas que se manejan. Por todo ello la tecnología del silicio es mucho más complicada que la del germanio.

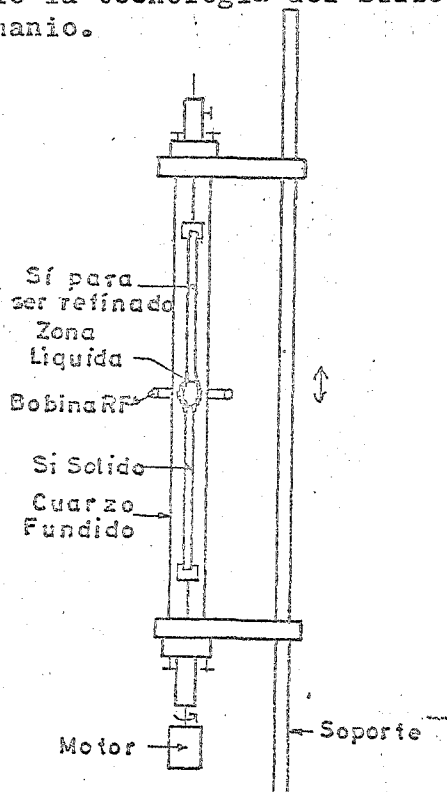


Fig. 56.7

diámetros, aproximándose a un valor límite para diámetros mayores: esta longitud máxima de la zona determinada por el parámetro  $\sigma/d$ . En la práctica se han refinado barras de silicio por este método de un diámetro de 3,5 cm.  $\sigma$  es la tensión superficial del silicio ( $\approx 720 \text{ din/cm}$ )

Hasta hoy, el silicio es procesado casi exclusivamente por la técnica de zona flotante. En ella, una zona fundida queda suspendida por su propia tensión superficial entre dos varillas colineales de silicio en posición vertical. Un dibujo esquemático puede verse en la Fig. 56.7. Cuando la zona líquida se mueve a través de la barra, se obtiene acción refinadora. Normalmente se aplica para la fusión calentamiento por RF. El diámetro normal de las barras que son refinadas por este método es de 35 mm.

La estabilidad de la zona flotante ha sido estudiada matemáticamente por varios autores y los resultados pueden resumirse en que la máxima longitud de zona que puede realizarse crece linealmente con el diámetro  $d$  de la barra para pequeños

### 56.3 TECNICAS DE CRECIMIENTO DE MONO CRISTALES SEMICONDUCTORES.

Estableceremos aquí las técnicas mas comunes, de uso en la actualidad, para la producción de materiales semiconductores con una resistividad prefijada y una perfección física tan alta como sea posible, todo ello a partir de materiales purificados según se vió en el apartado anterior.

#### 56.3.a CONTROL DE LA RESISTIVIDAD. CONSIDERACIONES TEORICAS.

En el crecimiento de cristales, controlar la resistividad implica controlar la concentración de impurezas en el cristal que se está creciendo. Consecuentemente muchas de las consideraciones hechas en 56.2.a podrán aplicarse aquí. En la técnica usual, se requieren cristales con concentraciones homogéneas de impurezas tipo P o N. De nuevo aquí, la concentración de impurezas incorporadas al cristal se controlará básicamente por el coeficiente de distribución. Describiremos aquí primero la forma de crecer monocristales puros de germanio o de silicio y luego veremos de que manera se variará la concentración de impurezas en el mismo para lograr un tipo u otro de semiconductor.

En la técnica de Czochralski el cristal se crece por extracción lenta de una semilla de cristal de un crisol en el que existe semiconductor fundido. El método se muestra esquemáticamente en la

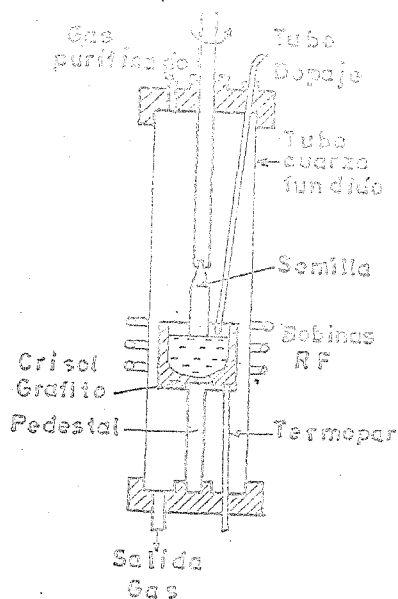


Fig. 56.8

El crisol está hecho, para el caso del germanio, normalmente de grafito de alta pureza. En el del silicio, de cuarzo fundido. El calentamiento y la fusión del semiconductor que se deposita en él se hace por lo general por RF, controlándose la temperatura mediante un termopar colocado en contacto con el crisol. Este control ha de ser muy cuidadoso no permitiéndose variaciones de más de  $0,1^{\circ}\text{C}$  ya que como se ha dicho antes, pequeñas variaciones de la misma afectarán a las dimensiones de la barra. A fin de asegurar una distribución de temperaturas con simetría radial, la semilla del cristal se rota a una velocidad de alrededor de 100 r.p.m. Antes de insertar la semilla, la temperatura del líquido deberá ajustarse ligeramente por encima del punto de fusión. Habrá de tenerse igualmente mucho cuidado de que el líquido moje al cristal completamente. La extracción se comienza entonces; las velocidades normales de extracción son del orden de 1 a 2 mm/min. Con el uso de esta técnica se han llegado a crecer cristales de hasta 15 cm.

La densidad de dislocaciones que aparece depende principalmente de la velocidad de extracción, de los gradientes de temperatura y de la perfección de la semilla. Con un crisol como el mostrado en la Fig. 56.8 esta densidad suele ser del orden de unos pocos miles por centímetro cuadrado. Perfeccionamientos en esta técnica pueden llegar a dar densidades de muy pocas dislocaciones por  $\text{cm}^2$ .

Otra técnica diferente a la anterior, que podríamos denominar vertical, es la desarrollada por Pfann y que es esencialmente horizontal con un método de nivelación de zona ("zone leveling"). En ella una zona líquida va atravesando una barra de germanio purificado situa-

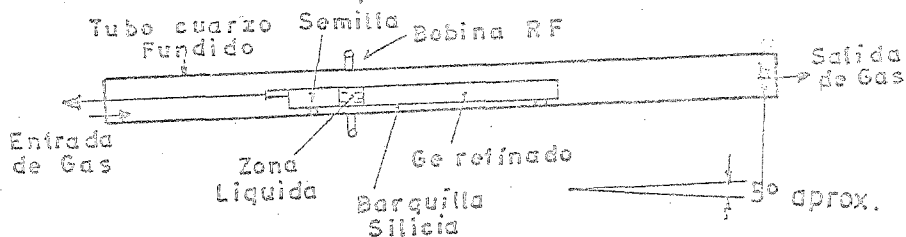


Fig. 56.9

do en el interior de una horquilla de silicio, partiendo de una semilla o germen de monocristal, según puede verse en la Fig. 56.9. El calentamiento se hace normalmente por RF por las mismas ventajas que se han visto anteriormente.

Una velocidad normal de movimiento de la zona es de 1 a 3 mm/min.

Esta técnica requiere, comparativamente, equipo sencillo y pocos cuidados después de su montaje, factores estos que hacen fácil su automatización. Es relativamente fácil obtener cristales de la forma deseada con resistividad uniforme. Sin embargo, el contacto del cristal que está creciendo con las paredes del contenedor incrementa la posibilidad de contaminación, siendo por ello prácticamente imposible su uso para el silicio.

Si ahora se desea obtener una barra con una concentración determinada de impurezas o bien ir formando uniones p-n, la manera de hacerlo será añadir de forma controlada las impurezas correspondientes a cada momento. Así, por ejemplo, cuando se desea una unión p-n, esto se consigue añadiendo una pequeña cantidad de una aleación del semiconductor base y del dopante correspondiente, por ejemplo galio sobre la solución. Ya que la masa del líquido es varios miles de veces superior a la de impureza añadida, el efecto térmico de una impureza añadida adecuadamente es despreciable y el crecimiento uniforme del cristal no se verá afectado. Con ello no habrá deterioro en la perfección del cristal que aparece de esta técnica de dopaje. El cristal formado aparecerá aproximadamente como se puede ver en la Fig.

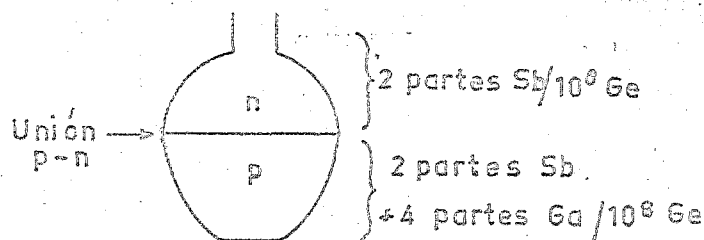


Fig. 56.10

56.10. Este proceso puede continuarse de forma alternada para conseguirse así sucesivas uniones.

El problema principal que se presenta, y que solo mencionaremos aquí, es el de conseguir uniformidad en la resistividad de las regiones formadas, esto es, uniformidad en los dopajes de las mismas. Como hemos dicho antes, esto se conseguirá controlando perfectamente todos y cada uno de los parámetros que intervienen en el crecimiento.

#### 56.4 PREPARACION DE LAS OBLEAS.

Una vez obtenidas las barras de material semiconductor monocristalino ha de procederse a la dirección de las mismas en un número muy elevado de obleas. Los procesos que se realizan son los siguientes.

##### 56.4.a CORTADO EN OBLEAS.

La barra de monocristal se corta en obleas de entre 10 y 15 mils (1 mil =  $10^{-3}$  pulgadas) de grosor, perpendiculares al eje de crecimiento. Se usan para ello seguetas con bordes de diamante. Frecuentemente, se emplean grupos de estas cuchillas a fin de efectuar varios cortes simultáneamente con el consiguiente ahorro de tiempo. Las rodajas cortadas son mucho más gruesas que las que se emplearán posteriormente. Ello es debido a los múltiples procesos que seguirán al corte y que la segqueta introducirá defectos mecánicos que habrán de eliminarse.

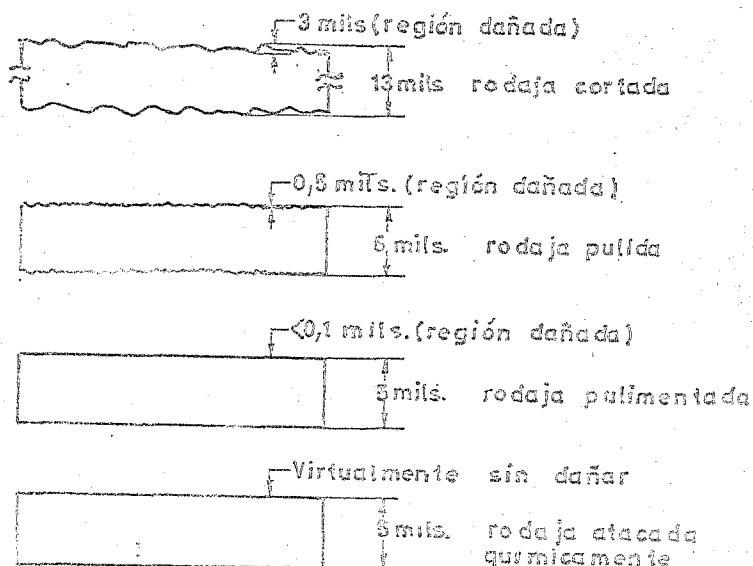


Fig. 56.11

#### 56.4.b PULIDO Y PULIMENTADO.

Las rodajas cortadas son dispuestas en máquinas pulidoras y pulidas hasta eliminar las marcas de la siqueta y regiones dañadas. Se reduce así el espesor de aproximadamente 13 mils a 6 mils (Fig.56.11). Pulidos sucesivos con granos cada vez mas finos irán eliminando los daños subsuperficiales hasta llegarse a la etapa final de pulimentado mecánico o ataque químico que deja a la superficie con un aspecto especular; mientras que un ataque químico deja a la oblea virtualmente sin imperfecciones superficiales, un pulido mecánico la deja con deterioros que son, con toda seguridad, menores de 0,1 mil. El ataque químico en cambio deja la superficie menos plana que el pulido, con los posibles trastornos posteriores.

## 57.1 TEORIA DE LA EPITAXIA.

Técnicas de crecimiento mediante corriente gaseosa se emplean frecuentemente en la tecnología de semiconductores, principalmente para depósitos de metales (por ejemplo, aluminio), aislantes ( $\text{SiO}_2$ ) y semiconductores (silicio). De estos procesos, el más importante desde el punto de vista de la fabricación de dispositivos es el crecimiento de capas de monocristal semiconductor sobre sustratos de monocristal del mismo tipo. Esta forma de crecimiento recibe el nombre de epitaxia (del griego epi, que significa sobre y el pasado del verbo teinen, que significa dispuesto).

La importancia del crecimiento epitaxial en la tecnología de dispositivos semiconductores es debida a la facilidad con que puede ajustarse la concentración de impurezas, en la que se está creciendo - independientemente de los que posea el sustrato. Únicamente es necesario controlar su concentración en el gas. Por ello puede emplearse para formar uniones p-n entre un sustrato y una capa epitaxial. Y más interesante aún, puede usarse para crecer capas de concentraciones de impurezas relativamente pequeñas sobre sustratos que contengan el mismo tipo de impurezas pero con concentraciones mucho más altas.

Debido a su importancia, el proceso ha sido estudiado con bastante detalle y existen formas de llevarse a cabo. Veremos aquí únicamente, los detalles mas generales de dos de ellos: el método directo y el indirecto.

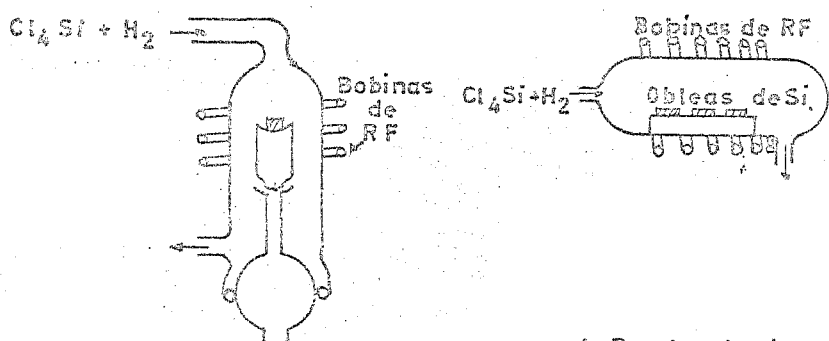
### 57.1.1 METODO DIRECTO.

En el método directo, el silicio pasa directamente de la fuente al sustrato sin reacciones intermedias. Los átomos que llegan a la superficie del mismo pueden mantenerse allí mediante fuerzas interatómicas cuando las condiciones son las adecuadas. Ejemplos de este método son la evaporación, la sublimación y la pulverización. Aunque tienen su importancia, no nos detendremos en ellos ya que serán vistos en otras partes.

### 57.1.2 METODOS INDIRECTOS.

Métodos indirectos son aquellos en los que los átomos de silicio se obtienen por la descomposición del vapor de un compuesto de silicio en la superficie del sustrato. Ejemplos son la reducción por el hidrógeno del  $\text{Cl}_4\text{Si}$ ,  $\text{Br}_4\text{Si}$ ,  $\text{Cl}_3\text{HSi}$  y la pirólisis de  $\text{SiH}_4$ . De todos ellos el más extensivamente usado -

es la reducción del tetracloruro de silicio. Aunque luego veamos con más detalle la tecnología de un reactor epitaxial, vamos a ver aquí el principio de funcionamiento.



(a) Reactor vertical

b Reactor horizontal

Fig. 57.1

Los dos tipos de reactores mas comunmente empleados son los que pueden verse en la Fig. 57.1. La Fig. 57.1.a muestra un reactor vertical, que fue el usado en los trabajos iniciales de Theuerer. La Fig. 57.1.b muestra



otro horizontal que es ya el más difundido en la moderna industria, ya que presenta la innegable ventaja de poder crecer capas simultáneamente en varias obleas. En ambos reactores, una corriente de hidrógeno con una cierta concentración de tetracloruro de silicio entra en el reactor. Las obleas reposan sobre un susceptor que es calentado mediante corrientes de radiofrecuencia. El reactor es, normalmente, de cuarzo fundido, y sus paredes, debido al método de calentamiento, permanecen frías durante todo el proceso. Esto elimina la posible deposición sobre ellas, con un mínimo de contaminación. Las obleas son mantenidas a una temperatura por encima de los 1.000°C. Esta alta temperatura se necesita por el hecho de que los átomos que van a depositarse deben encontrar la posición adecuada en la malla cristalina para formar el mismo tipo de monocristal que el sustrato. Según decrece la temperatura, la movilidad de los átomos depositados decrece y la capa resultante es mas y mas defectuosa, llegando a perder su estructura cristalina.

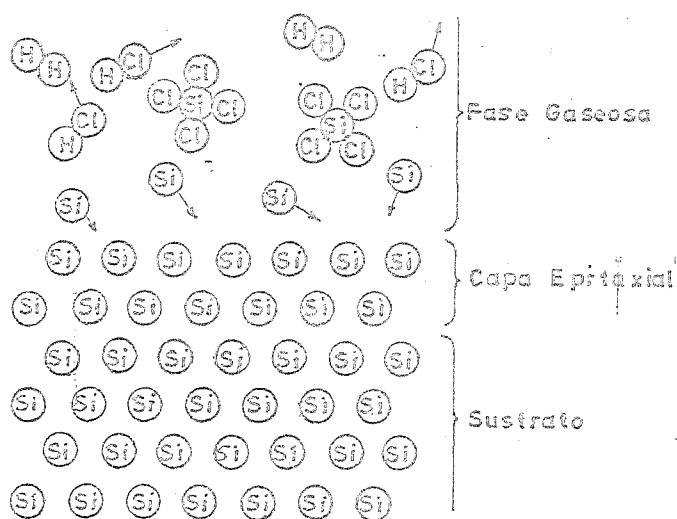
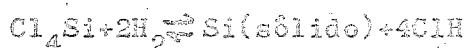


Fig. 57.2

Al pasar el gas por la superficie del cristal, la reacción general que se produce es la siguiente (Fig. 57.2).



Esta reacción es reversible, esto es, puede ocurrir en ambas direcciones. Si el gas que entra en el reactor contiene  $\text{ClH}$  ocurrirá una eliminación de  $\text{Si}$  en lugar de crecimiento. Se sabe también que ocurre además otra reacción simultánea que contrasta los efectos de la anterior. Es la dada por

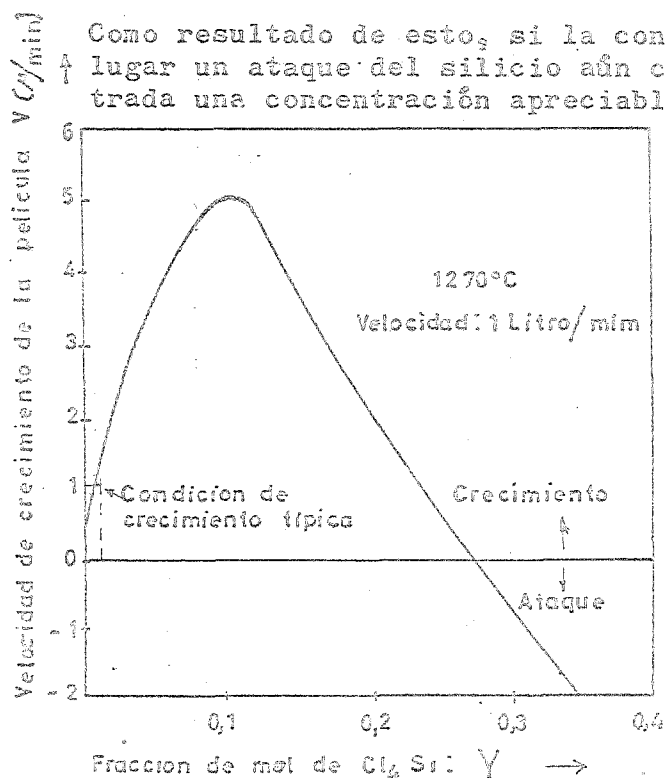
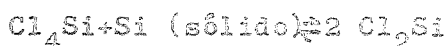


Fig 57.3

Como resultado de esto, si la concentración de  $\text{Cl}_4\text{Si}$  es muy alta, tendrá lugar un ataque del silicio aún cuando no exista en la corriente de entrada una concentración apreciable de  $\text{ClH}$ . Esto queda ilustrado en la Fig. 57.3 que muestra el efecto de la concentración de  $\text{Cl}_4\text{Si}$  en el gas de la reacción. Puede verse que, inicialmente, incrementando la concentración de  $\text{Cl}_4\text{Si}$  aumenta la velocidad de crecimiento de la capa. Pero este incremento llega a un máximo para una fracción de mol de alrededor de 0.1. (Las concentraciones en gases se dan mas convenientemente en términos de fracción de mol, donde definimos la fracción de mol  $Y$  como el cociente del número de moléculas de un cierto tipo al número total de moléculas en el gas). Un posterior incremento en la concentración da lugar a una disminución en la velocidad de crecimiento llegando, eventualmente a invertirse la operación y aparecer un ataque del silicio.

Normalmente, se crece el silicio en la región de baja concentración, según puede verse en la Fig. 57.3, con una velocidad de crecimiento típica de alrededor de  $1\mu/\text{min}$ . En esta región la dependencia de la velocidad de crecimiento de la capa V con la fracción de mol V de  $\text{Cl}_4\text{Si}$  en la mezcla de gas es aproximadamente lineal.

### 57.1.3 DEFECTOS.

Las imperfecciones cristalinas y los defectos juegan un importante papel en las propiedades eléctricas y mecánicas de los materiales y dispositivos semiconductores. La perfección de la superficie de las obleas es particularmente importante para prevenir futuros defectos en capas crecidas sobre ellas epitaxialmente. Independientemente de las precauciones tomadas en una limpieza previa de los substratos antes del crecimiento epitaxial, es seguro que en ellos aparecerán imperfecciones mecánicas, trazas de óxido ( $\text{SiO}_2$ ), polvo residual y otras impurezas. Estas impurezas pueden preverse que afectarán al crecimiento de varias formas: pueden acelerar o decelerar la velocidad de las etapas de formación; pueden causar dislocaciones; y pueden también, finalmente, pasar a formar parte del cristal originando tensiones y distensiones en la malla. Estos contaminantes aparecerán como dislocaciones, defectos lineales, hendiduras, ("etch pits"), montículos ("hillocks") o pirámides, conos y regiones policristalinas.

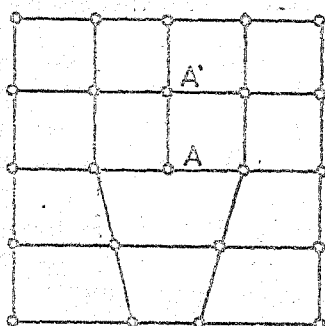


Fig. 57.4

El tipo más común de defectos es la dislocación de la Fig. 57.4 que se denomina dislocación en arista ("edge dislocation"). Los átomos se representan por intersecciones de líneas y los presentes en un plano cristalográfico están conectados por rectas. La distorsión de la malla en A se debe a haberse cortado la línea de átomos A'A, en A. Si los otros planos atómicos se comportan exactamente como el mostrado y están colocados por debajo de él, un plano atómico, (del que AA' forman parte) trazará una línea perpendicular al papel. Esta línea se denominará una dislocación en

arista. Las dislocaciones pueden actuar como núcleos para la precipitación de átomos extraños o impurezas que puedan estar presentes en la malla de silicio. Estas impurezas emigrarán a las dislocaciones para compensar parte de la tensión de malla presente en los lugares de la dislocación. Las regiones heterogeneas creadas pueden dar lugar a malas características en los dispositivos que las contengan:

El número de dislocaciones en la capa que se está creciendo, es substancialmente el mismo que en el substrato, siempre que las obleas estén limpias suficientemente. Por ello los efectos degradantes de las dislocaciones pueden minimizarse limpiando rigurosamente las obleas y eligiéndolas con baja densidad de dislocaciones iniciales.

A fin de comprender mejor la formación de otros tipos de defectos, recordemos algunos conceptos de cristalografía que ya deben ser suficientemente conocidos.

Según sabemos, los cristales crecen según ciertas direcciones preferidas estando gobernadas sus formas geométricas por sus direcciones de crecimiento más lento. Las caras de un cristal son perpendiculares así a la dirección de crecimiento más lento siendo así una

manifestación macroscópica de la estructura atómica. La Fig. 57.5 muestra una célula unidad del sistema cúbico. El plano ABCD, por ejemplo, puede definirse en función de sus índices de Miller que eran, según se sabe, los recíprocos de los valores con que un plano corta a los ejes cristalográficos. En el caso del plano ABCD vemos que corta a los ejes x e y en el infinito y al z en 1; por ello su nomenclatura será (001).

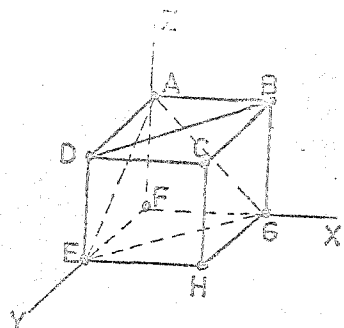


Fig. 57.5

en las caras, desplazadas una

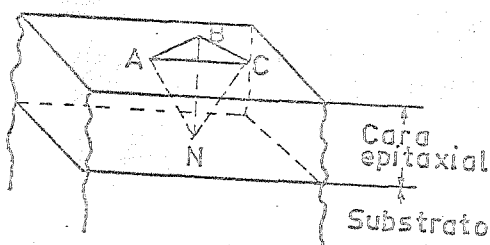


Fig. 57.6

de los puntos de uno de los planos el orden se altere con respecto a los otros del mismo plano, se iniciará un defecto de apilamiento ("stacking fault") que se propagará en la capa que se hace crecer. Esto es lo mostrado en la Fig. 57.6. La posición de cristal crecida en el interior del tetraedro ABCD carece del orden del resto existiendo así discontinuidades en las caras. Dentro y fuera del tetraedro pueden encontrarse estructuras cristalográficas perfectas; pero en sus caras aparecerán desajustes. Una falta de este tipo en una oblea con orientación (111) se manifestará como un triángulo perfecto cuando sea tratada adecuadamente.

Una perturbación mayor sobre la superficie de la oblea, como un arañazo por ejemplo, originará la correspondiente perturbación en la superficie final. Esto afectará a la uniformidad de los resultados de etapas posteriores, tales como difusión y enmascaramiento y dará lugar a circuitos integrados defectuosos.

#### 57.1.4 TECNICAS DE CRECIMIENTO.

Describiremos aquí el sistema básico y las técnicas empleadas en la deposición por vapor de silicio monocristalino sobre sustratos de silicio orientado. Se pueden encontrar una gran variedad de reacciones químicas y de temperaturas de deposición, y aunque todas ellas conducen, nominalmente a los mismos resultados, la realidad es que algunos procesos dan lugar a capas epitaxiales de mejor calidad que otros. Las técnicas a emplear comprenden varias etapas. Las que mencionaremos aquí, por su importancia, son: preparación del sustrato, atacado y calentamiento y requisitos del suscepto.

##### 57.1.4.1 PREPARACION DEL SUBSTRATO.

A fin de reducir imperfecciones, las obleas de silicio para la epitaxia se preparan usualmente por el método Czochralski. Ello -

es debido a que una oblea sin deformaciones o imperfecciones dará lugar al crecimiento epitaxial de un buen monocristal, mientras que si posee pequeñas irregularidades estas se reproducirán en la capa epitaxial. Todos los métodos de crecimiento requieren una serie de operaciones de pulido con granos de abrasivo de tamaño cada vez menor y un ataque químico final en una solución de  $\text{NO}_2$  H-FH que elimina el óxido de la superficie quedando esta con una apariencia completamente especular aunque no exenta de imperfecciones. Un pulido adicional se realiza ya en el reactor epitaxial mediante vapor de agua o  $\text{ClH}$  anhidro.

Después de este pulido inicial, las obleas de sustrato de silicio se colocan, sobre un suscepter adecuado, en la cámara de reacción donde la deposición epitaxial va a tener lugar. Un típico sistema de deposición epitaxial es el de la Fig. 57.7.

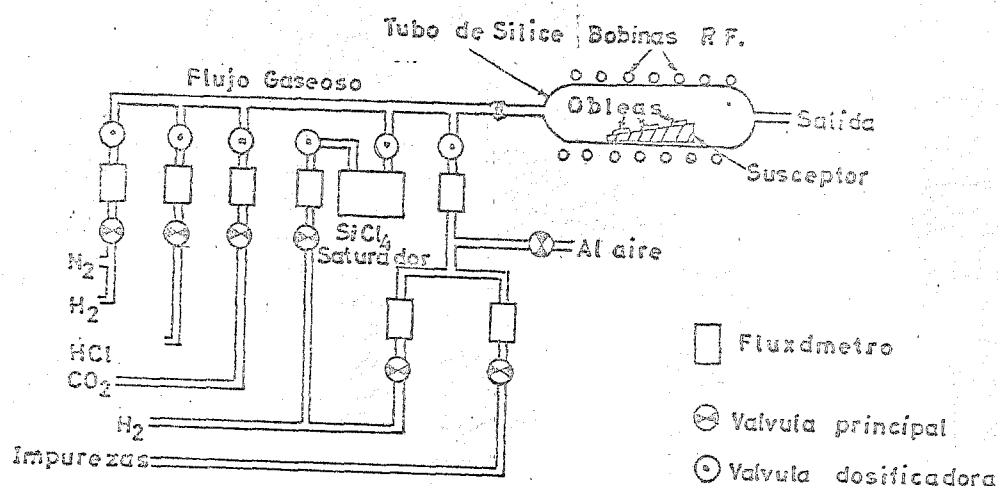


Fig. 57.7

Antes de que las obleas comiencen a ser calentadas, y a fin de eliminar el posible aire contenido en el sistema, se hace pasar una corriente de nitrógeno o algún gas mas inerte, como He, por el mismo. A continuación tiene lugar un prelavado de las obleas, ya a la temperatura de reacción, durante cinco minutos con  $\text{H}_2$  puro hasta que se alcance equilibrio térmico. Hay que procurar eliminar por completo cualquier residuo de  $\text{O}_2$  que puede existir en la corriente de  $\text{H}_2$  ya que su presencia causaría rugosidades en las superficies e incrementaría los defectos.

Una vez que se ha conseguido la temperatura de equilibrio, se introduce  $\text{ClH}$  anhidro en el  $\text{H}_2$  puro estableciéndose el flujo deseado de gas. A fin de conseguir asegurar una mezcla homogénea en la corriente de gas que se introduce suele ser conveniente introducir una cierta turbulencia en el mismo. Una vez que se ha eliminado la cantidad conveniente de silicio, se detiene el suministro de  $\text{ClH}$  dejando que circule por el sistema una corriente de  $\text{H}_2$  durante varios minutos. El proceso de deposición epitaxial comienza ahora con la introducción de los gases adecuados en el sistema.

#### 57.1.4.2 PROCEDIMIENTOS DE DOPAJE.

Como hemos dicho anteriormente, en el crecimiento epitaxial los átomos de impurezas se incorporan a la malla cristalina mientras la capa crece. La relación entre el número de átomos de impurezas y el de silicio en la fase gaseosa se controla de manera que la capa que se forma tenga la concentración de impurezas adecuadas. Cambiando bien en tipo de impurezas o bien su concentración, las características de la zona epitaxial pueden variarse entre márgenes muy amplios.

Existen dos técnicas de dopaje de carácter estable y reproductibles: dopaje en la solución y dopaje en el gas. Ambas llevan consigo la adición de las impurezas apropiadas de los grupos III ó V a la corriente de gas que circula durante el ciclo de crecimiento.

El dopaje en la solución se emplea sobretodo en dopajes del tipo n. En este caso, al depósito donde se encuentran el  $\text{Cl}_4\text{Si}$  líquido se agregan las correspondientes impurezas que se evaporarán al mismo tiempo que aquel dopando así la capa epitaxial que crecerá por la reducción del  $\text{Cl}_4\text{Si}$  por el hidrógeno. Existe el inconveniente, sin embargo, de que para cada nivel de dopaje es necesaria una solución diferente. Esto hace más ventajoso el método siguiente, el de dopaje en el gas, que posee una mayor flexibilidad.

En la técnica de dopaje en el gas, los dopantes se agregan al sistema por medio de corrientes separadas de los correspondientes gases. Los mas usados son  $\text{B}_2\text{H}_6$ ,  $\text{AsH}_3$  y  $\text{PH}_3$  que se diluyen en  $\text{H}_2$  agregándose al sistema en la concentración deseada. La mayor parte de ellos son venenosos por lo que han de tomarse las debidas precauciones en su manejo.

#### 57.1.4.3 SUSCEPTORES.

El susceptor tiene como misión la de dar, al mismo tiempo, soporte y calor a las obleas durante el proceso de deposición. A fin de evitar contaminación de las mismas, el susceptor habrá de ser químicamente inactivo y tener un mínimo de desprendimiento de gas. Su calentamiento es, normalmente, por RF, empleándose frecuencias bajas (del orden de 450 kHz). El cálculo de la bobina inductora habrá de hacerse de acuerdo con el tamaño del susceptor (o viceversa) de forma que haya una máxima transferencia de energía. El paso de calor a las obleas tiene lugar por conducción y radiación térmica.

Los susceptores son de grafito cubiertos con silicio puro, sílice, carburo de silicio o compuestos de molibdeno-silicio.

#### 57.2 OXIDACION.

El proceso de oxidación es uno de los mas esenciales en la técnica planar que, a su vez, es el fundamento de toda la técnica de dispositivos integrados de silicio. Inicialmente, su único papel fue el de enmascarar durante la difusión y de proteger la superficie una vez acabado el proceso. Pero sus aplicaciones han ido aumentando en los últimos años pasando a ser parte integrante de elementos tanto activos como positivos. Esto ha reverdecido el interés por el estudio del proceso de oxidación y las propiedades del óxido resultante. A pesar de ello, aun quedan una gama muy amplia de detalles sin resolver y problemas sin aclarar. Intentaremos aquí dar unas breves nociones del proceso de oxidación y sus principales aplicaciones.

#### METODOS DE FORMACION DE OXIDO.

Las capas de dióxido de silicio sobre la superficie de las obleas pueden formarse por varios métodos. Así, por ejemplo, pueden depositarse a través de una reacción con vapor, o pueden formarse por oxidación (anodización) electroquímica, o por reacción de plasma. En la práctica industrial, la forma mas comun de crecerles es mediante oxidación térmica del silicio a través de la reacción química.



según se use oxígeno puro o vapor de agua.

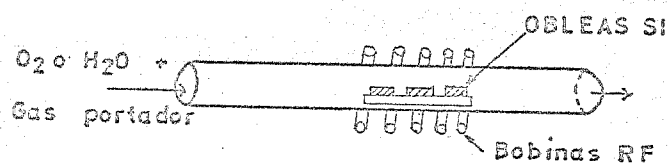


Fig. 57.8

La oxidación térmica del silicio se realiza en hornos de oxidación o reactores del tipo ilustrado esquemáticamente en la Fig. 57.8. El de la figura es del tipo que se denomina de oxidación por vapor en tubo abierto. El reactor, tubular, usualmente de cuarzo, es calentado por un horno a temperaturas que varían entre 900 y 1.200°C. Un gas con el medio oxidante (Normalmente oxígeno o vapor de agua) circula a través del reactor sobre las obleas de silicio. Las velocidades del flujo de gas son típicamente del orden de 1 cm/seg. Del pro-

ceso se desprende que parte del silicio de la oblea ha de emplearse en la constitución del óxido pudiendo demostrarse, en función de las densidades y de los pesos moleculares, que para haber formado una capa de óxido de espesor  $X_o$  ha sido necesaria una de silicio de valor  $0,425 X_o$ .

La crítica del crecimiento térmico del óxido está bastante bien entendida y puede encontrarse en la literatura. El proceso de oxidación, según ha sido demostrado mediante el empleo de trazadores radioactivos y otros métodos, tienen lugar mediante un movimiento hacia el interior del agente oxidante, hacia la zona de reparación del silicio con el óxido ya formado, en lugar de al revés (movimiento del silicio hacia la superficie externa del óxido) como tiene lugar por ejemplo en el caso del cobre. Por ello, según va avanzando la oxidación, las moléculas de oxígeno habrán de difundirse a través de una capa cada vez mayor de  $SiO_2$  hasta llegar a la superficie del Si donde tendrán lugar las reacciones ya vistas. Consecuentemente la velocidad de crecimiento del óxido decrece rápidamente según aumenta el espesor de la capa de óxido. Puede demostrarse que para capas muy delgadas de  $SiO_2$ , la velocidad de crecimiento es lineal con el tiempo. Sin embargo, según aumenta el espesor  $X_o$ , la velocidad se hace proporcional a  $\sqrt{t}$ .

#### PROPIEDADES DE MASCARA DEL $SiO_2$ .

Los coeficientes de difusión de la mayor parte de los dopantes a través del  $SiO_2$  son, por lo menos, de un orden de magnitud de dos a cuatro veces menor que a través del Si. Por ello, para estas impurezas, una capa de  $SiO_2$  del grosor adecuado puede servir de barrera a la difusión. La anchura mínima de óxido necesaria para enmascarar contra una difusión determinada depende, en gran medida, de las características de dicho proceso de difusión, tales como tipo de dopantes, concentraciones, temperatura y tiempo.

58 DIFUSION.

El proceso de difusión es, sin duda, el método más empleado de introducción de cantidades controladas de impurezas en un sustrato de silicio. Es un proceso relativamente bien entendido y con unas características de reproductibilidad muy altas.

Difusión, como proceso general, es el mecanismo por el que diferentes conjuntos de partículas confinadas en un mismo volumen tienden a extenderse y reagruparse de forma homogénea a través de todo el volumen que las contiene. En el caso de dispositivos de estado sólido y circuitos integrados, el proceso de difusión más importante es aquel que se relaciona con el movimiento y la distribución de impurezas en una estructura cristalina. En sólidos cristalinos, el proceso de difusión es únicamente importante a temperaturas elevadas donde la energía térmica de los átomos de la malla tiene una cierta probabilidad de superar a las fuerzas interatómicas que mantienen a la malla unida.

En una malla simple de silicio, las impurezas pueden moverse a través de la misma por uno cualquiera de los dos siguientes mecanismos o una combinación de ambos:

Difusión sustitucional: Los átomos de impurezas se propagan a través de la malla reemplazando a los átomos de silicio en determinados lugares.

Difusión intersticial: Los átomos de impurezas no reemplazan a los átomos de silicio en sus lugares correspondientes, sino que rellenan huecos en la malla tridimensional.

No se puede decir, desde un punto de vista absoluto, cual de estos dos procesos ocurre mas abundantemente en cada tipo de dispositivo. Únicamente, de forma general, podemos decir que en los circuitos integrados analógicos predomina la difusión sustitucional y que en los digitales podemos encontrarnos bastantes casos de difusión intersticial.

Las impurezas que se difunden en el silicio para determinar el tipo y resistividad de las diferentes regiones del material semiconductor son elementos de los Grupos III y V de la Tabla Periódica, para regiones dopadas del tipo p o del tipo n, respectivamente. Algunos de estos dopantes vienen dados en la Tabla 58.1. Para la fabricación de circuitos integrados, los dopantes mas comunmente utilizados son B, P, Al y Sb.

TABLA 58.1. Dopantes tipos p y n empleados en la fabricación de dispositivos de silicio.

<u>Tipo p</u>	<u>Tipo n</u>
Boro (B)	Fósforo (P)
Aluminio (Al)	Arsénico (As)
Gallio (Ga)	Antimonio (Sb)
Indio (In)	

58.1 TEORIA DE LA DIFUSION.

Aunque el proceso de la difusión tiene lugar en las tres dimensiones simultáneamente, para el análisis de las propiedades fundamentales de dicho proceso, es suficiente considerar únicamente una sola dimensión. Como veremos más adelante, la geometría y las dimensiones de la mayor parte de los dispositivos semiconductores fabricados por técnica planar justifica esta suposición.

La propiedad física fundamental del proceso de difusión es la de que las partículas tienden a moverse desde regiones de alta concentración a regiones de baja concentración, a una velocidad que es proporcional al gradiente de las concentraciones entre las dos regiones. Esto se conoce como primera ley de Fick y puede expresarse matemáticamente como

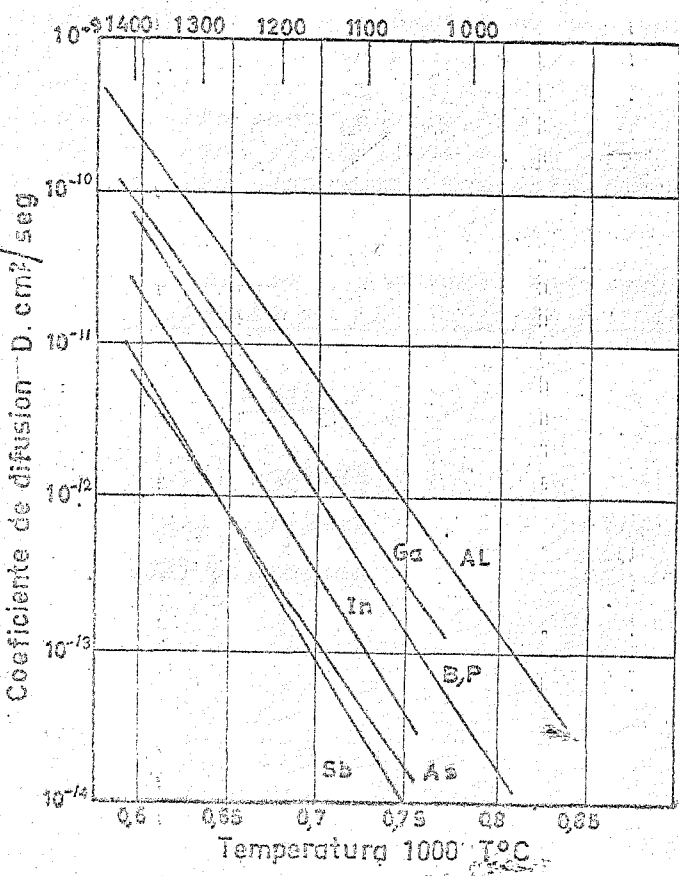
$$F = - D \frac{\partial N}{\partial X} \quad (58.1)$$

donde F es la densidad de flujo de partículas que se difunden, esto es, el número neto de partículas que atraviesan una superficie unidad normal a la dirección del flujo, por unidad de tiempo; N es el número de partículas por unidad de volumen y X es la distancia medida paralelamente a la dirección del flujo. El término D se denomina coeficiente de difusión y tiene unidades de (longitud)<sup>2</sup>/tiempo. La magnitud de D da una medida de la facilidad o dificultad con que una partícula que se difunde puede moverse en su entorno. El signo negativo que aparece, indica que el flujo de partículas va de las regiones de mayor concentración a las de menor.

En todo los problemas de difusión, aparte de ser interesantes las variaciones de la concentración con el espacio, lo son también las variaciones con el tiempo. La ley fundamental que relaciona la variación en el tiempo con la variación en el espacio puede obtenerse de la primera ley de Fick con la aplicación de un principio de continuidad. Para ello, consideramos una región del material, rodeado por un área A normal al flujo, y un dx paralelo al flujo. El flujo neto de partículas en este volumen, puede escribirse como

$$FA - (F + \frac{\partial F}{\partial X} dx) A = - \frac{\partial F}{\partial X} dx A \quad (58.2)$$

Temperatura °C



Este flujo neto en el interior del volumen puede relacionarse al cambio de concentración en el mismo por

$$\frac{\partial N}{\partial t} dx A = - \frac{\partial F}{\partial X} dx A \quad (58.3)$$

La expresión para ( $\partial F / \partial X$ ) puede obtenerse diferenciando (58.1) y llevándolo a (58.3) se obtiene.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial X^2} \quad (58.4)$$

Esta ecuación se conoce como segunda ley de Fick, y determina la distribución de impurezas en un punto dado del semiconductor en función del tiempo.

El coeficiente de difusión D es característico de impurezas del dopaje

Fig. 58.1



purezas que se considere siendo una función exponencial de la temperatura. La Fig. 58.1 muestra los coeficientes de difusión de varios dopantes en el silicio, en función de la temperatura.

Ya que (58.4) es una ecuación diferencial parcial de segundo orden, las soluciones particulares aplicables a un problema de difusión dado, dependen de las condiciones de contorno asociadas con el proceso de difusión dado. La mayor parte de los procesos de difusión encontrados en la fabricación de circuitos integrados caen en una de las dos siguientes clases de condiciones de contorno: difusión por fuente constante y difusión por fuente limitada. Analizaremos ahora, más detalladamente cada una de ellas.

#### 58.1.A DIFUSION DESDE UNA FUENTE CONSTANTE.

En este tipo de difusión, la concentración de impurezas en la superficie del semiconductor se mantiene a un nivel constante - a lo largo de todo el ciclo de difusión, esto es,  $N(0,t) = \text{constante} = N$ . El nivel constante de impurezas sobre la superficie viene determinado por la temperatura y el flujo de gas en el tubo de difusión. En la mayor parte de los sistemas de difusión por fuente constante, es conveniente dejar que la concentración en la superficie,  $N$ , venga determinada por la solubilidad límite en silicio del dopante correspondiente.

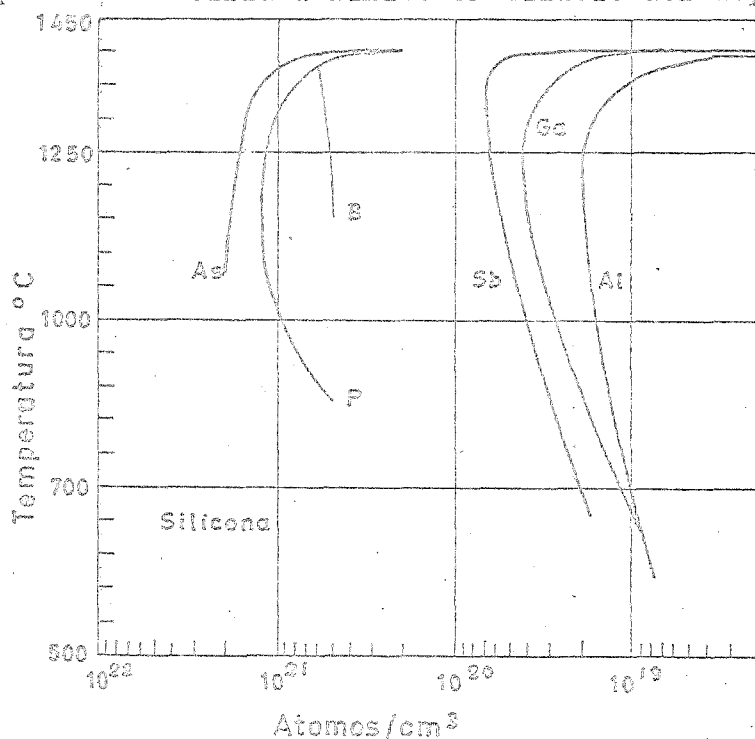


Fig. 58. 2

Como puede verse en la Fig. 58.2 la solubilidad límite es también una función fuertemente dependiente de la temperatura.

El proceso de difusión de fuente constante puede describirse mediante la solución de la ecuación (58.4) con las condiciones de contorno:

$$N(0,t) = N_0 = \text{constante}$$

$$N(x > 0, 0) = 0 \quad (58.5)$$

La solución particular que resulta puede expresarse como

$$N(x,t) = N_0 \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{Dt}}} e^{-\lambda^2} d\lambda \right) \quad (58.6)$$

donde  $\lambda$  es una variable de integración. La parte de solución en el interior del paréntesis es una función bien conocida y tabulada en términos de su argumento. Es conocida como función de error complementaria y designada por erfc. Por ello, la concentración resultante en cualquier punto dado dentro del silicio, puede escribirse como

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc} (x/(2 \sqrt{Dt})) \quad (58.7)$$

Una gráfica de la función de error complementaria puede verse en la

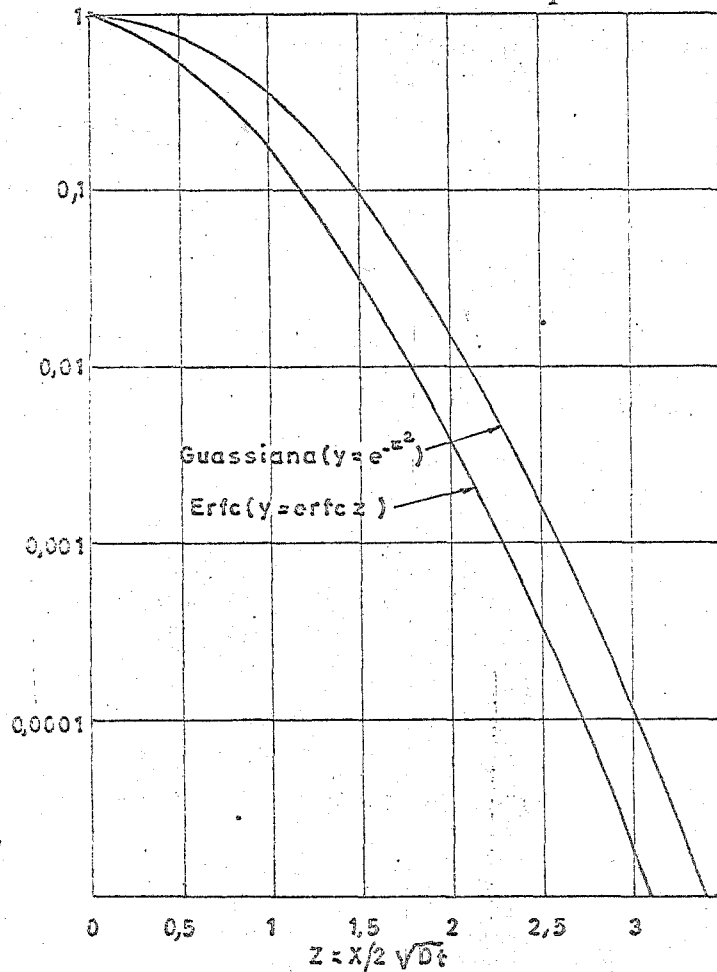


Fig. 58.3

Fig. 58.3 para un cierto rango de valores de su argumento.

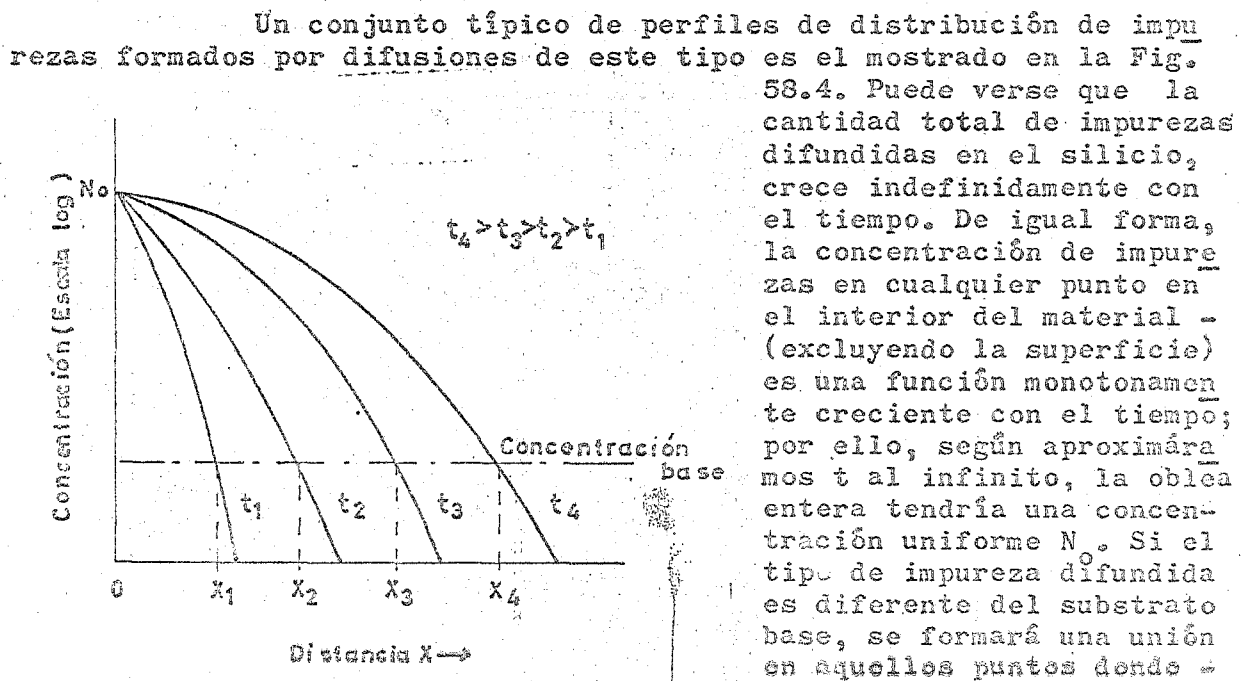


Fig. 58. 4

Un conjunto típico de perfiles de distribución de impurezas formados por difusiones de este tipo es el mostrado en la Fig. 58.4. Puede verse que la cantidad total de impurezas difundidas en el silicio, crece indefinidamente con el tiempo. De igual forma, la concentración de impurezas en cualquier punto en el interior del material - (excluyendo la superficie) es una función monotonamente creciente con el tiempo; por ello, según aproximáramos  $t$  al infinito, la oblea entera tendría una concentración uniforme  $N_0$ . Si el tipo de impureza difundida es diferente del sustrato base, se formará una unión en aquellos puntos donde -

las dos concentraciones se igualan. Estas profundidades de la unión son las designadas como puntos  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ . En la fabricación de circuitos, difusiones de este tipo se usan para las etapas de aislamiento y de difusión del emisor.

Ejemplo: Una unión p-n es formada mediante difusión por fuente constante de boro en un sustrato de silicio, que en un principio posee una concentración tipo n de  $10^{16}$  átomos/cm<sup>3</sup>. La etapa de difusión se realiza a 1250°C manteniendo la concentración de boro en la superficie en el límite de solubilidad en sólido. Calcular el tiempo de difusión  $t$  necesario para obtener una profundidad de la unión de 9 micras.

La concentración en la superficie viene determinada por la Fig. 58.2 como  $N = 5,5 \cdot 10^{20}$  átomos/cm<sup>3</sup>. A 1250°C el coeficiente de difusión del boro es  $5 \cdot 10^{-12}$  cm<sup>2</sup>/seg (ver Fig. 58.1). La unión se deformará cuando  $N(x,t)$  sea igual a la concentración inicial. Así:

$$\frac{N(x,t)}{N_0} = 1,82 \cdot 10^{-5} = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

donde  $x = 9 \mu$ . De la Fig. 58.3 se puede obtener que  $t = 4000$  s = 66,5 minutos.

#### 58.1B DIFUSION DESDE UNA FUENTE LIMITADA.

En este tipo de difusión, la cantidad total de impurezas introducidas en el semiconductor a lo largo de todo el proceso está limitada. Esto se consigue depositando sobre la superficie del silicio una cantidad de átomos de impureza por unidad de área de la superficie expuesta, durante una corta "predeposición", etapa anterior a la difusión real. Esta predeposición es seguida por un ciclo "conductor" en el que la fuente de impurezas es suprimida y la cantidad de impurezas ya depositadas durante la "predeposición" se difunde en el sustrato de silicio. Con este tipo de difusión, la profundidad de penetración de las impurezas durante la predeposición se supone despreciable con respecto con la profundidad final conseguida después del ciclo de "conducción". Así pues, la distribución inicial de impurezas  $N(x,0)$  se supone es una función delta, en la superficie del semiconductor. Con ello la condición de contorno para la ecuación básica de la difusión (58.4) es

$$\int_0^{\infty} N(x,t) dx = Q = \text{constante} \quad (58.8)$$

donde  $Q$  es la concentración de impurezas depositada en un principio sobre la superficie (en átomos/cm<sup>3</sup>). La solución de la ecuación es entonces

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{4Dt}} e^{-x^2/4Dt} \quad (58.9)$$

El perfil de impurezas dado por (58.9) se conoce como distribución Gaussiana. Una gráfica normalizada de esta distribución es la dada en la Fig. 58.3 en función de su argumento. La Fig. 58.5 muestra un dibujo del perfil de la difusión por fuente limitada para valores crecientes del tiempo. Puede verse que en este tipo de difusión, la concentración en la superficie  $N_0$  es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de difusión. En la fabricación de circuitos integrados, la difusión por fuente limitada se usa normalmente en la formación de las regiones de base.

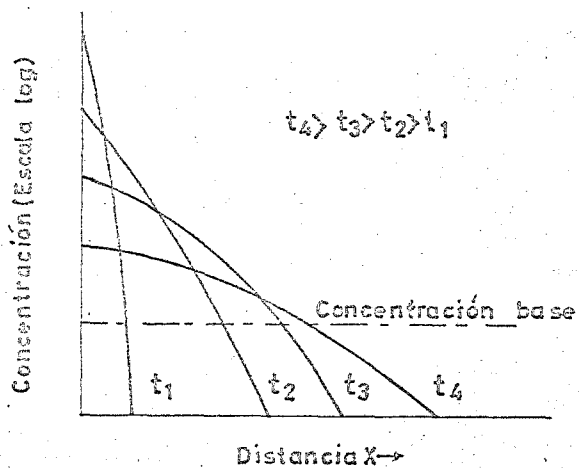


Fig. 58.5

Ejemplo: Sobre una superficie de silicio son depositados  $10^{16}$  átomos de Boro/cm<sup>2</sup>, anteriormente a la etapa de difusión por fuente limitada. El substrato de silicio tiene una concentración inicial de impurezas tipo n, de valor  $N_B = 10^{16}$  átomos/cm<sup>3</sup>. Determinar la profundidad de la unión después de una difusión de una hora a 1100°C.

El coeficiente de difusión del boro a 1100°C se obtiene de la Fig. 58.1 y su valor es  $3 \cdot 10^{-13}$ . Entonces la ecuación (58.9) podrá escribirse como

$$e^{-x^2/4Dt} = \frac{N_B \sqrt{\pi Dt}}{Q} = 5,8 \cdot 10^{-5}$$

de la Fig. 58.3 se obtiene

$$\frac{x^2}{4Dt} = 3,3 \quad \text{o} \quad x = 1,2 \mu$$

#### 58.1.0 PROPIEDADES BASICAS DEL PROCESO DE DIFUSION.

En el diseño de los circuitos monolíticos, deben considerarse las siguientes tres propiedades fundamentales:

1. Todas las difusiones actúan simultáneamente. Las impurezas introducidas en difusiones previas, continúan difundiendo durante las siguientes difusiones. Por ello, cuando se calcule el tiempo de difusión total efectivo para un perfil de impurezas dado, se deberá considerar los efectos de los ciclos de difusión que se realicen a continuación. Los efectos de las difusiones posteriores sobre un perfil de impurezas dado puede estimarse definiendo un producto ( $Dt$ ) efectivo para el perfil particular de impurezas, como

$$(Dt)_{ef} \approx D_1 t_1 + D_2 t_2 + D_3 t_3 + \dots \quad (58.10)$$

donde  $t_1, t_2$ , etc. son los diferentes tiempos de difusión y  $D_1, D_2$ , etc. los correspondientes coeficientes de difusión, determinados por las temperaturas respectivas de los ciclos de difusión. Así, por ejemplo, en la fabricación de dispositivos planares, la región de emisor de un transistor bipolar se forma por un proceso de difusión que sigue a la etapa de difusión de la base. Por ello, el producto efectivo  $Dt$  de la región de base contiene una contribución finita de la etapa de difusión del emisor.

2. Los perfiles de difusión de (58.7) y (58.9) son ambas funciones de  $(x/\sqrt{Dt})$ . Por ello, para una superficie dada y una concentración inicial, las profundidades de unión  $x_1$  y  $x_2$  asociadas con las dos difusiones separadas, poseyendo ambas diferentes tiempos y temperaturas, pueden relacionarse por

$$\frac{x_1}{x_2} = \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \quad (58.11)$$

3. La difusión tiene lugar no solamente hacia abajo, esto es en sentido perpendicular a la superficie por la que penetran las impurezas, sino también a derecha e izquierda. Cuando se consideran las dimensiones laterales de los dispositivos planos, y particularmente en el caso de los transistores pnp laterales (que se verán más adelante), esta difusión lateral ha de tenerse en cuenta.

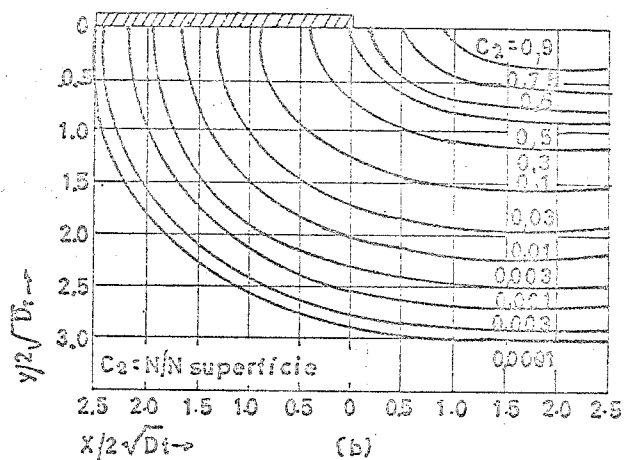
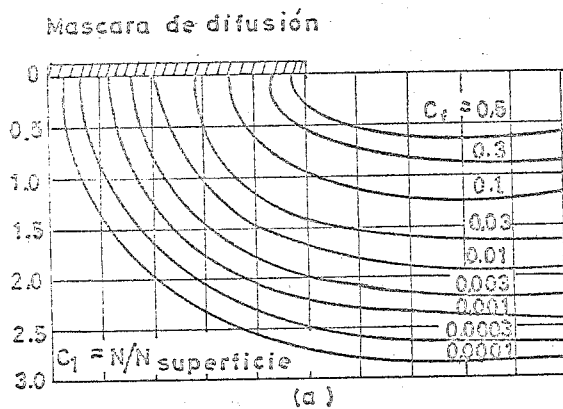


Fig. 58.6

La Fig. 58.6 muestra la difusión lateral para diferentes valores de las concentraciones. La Fig. 58.6 (a) da los contornos de concentración constante para el caso de una difusión por fuente constante. Los contornos de difusión de la Fig. 58.6 (b) corresponden al caso de fuente constante. En ambos casos la difusión lateral es del orden del 75 al 80 por ciento de la penetración vertical.

## 58.2 TÉCNICAS DE DIFUSIÓN.

Generalmente, cada etapa de difusión puede decirse que es un proceso en dos etapas. La primera es una difusión de una película relativamente delgada de impurezas sobre la superficie de silicio. En la segunda, el silicio es suprimido de la fuente de la impureza y calentado en una atmósfera libre de impurezas de forma que la única difusión que aparece es una redistribución de aquellas impurezas introducidas originalmente. Las razones para preferir este método sobre el de una única etapa de calentamiento son, entre otras: a) mejor control y reproducibilidad, b) mejor enmascaramiento y c) más favorable distribución de impurezas. Veremos aquí algunas de las disposiciones usadas en la difusión de impurezas sobre silicio haciendo especial énfasis en los procesos de dos etapas sobre tubo abierto ya que éste es el método más común.

Esta técnica, la más extendida actualmente, es la que también podía denominarse sistema de flujo continuo. Existen de ella un gran número de variantes. Estas variaciones dependen principalmente de la naturaleza de la fuente. Raramente se presenta esta en su estado elemental, sino más como un compuesto: gaseoso, líquido o sólido. Cuando se emplea una fuente sólida se requiere, por lo general, un horno de dos zonas

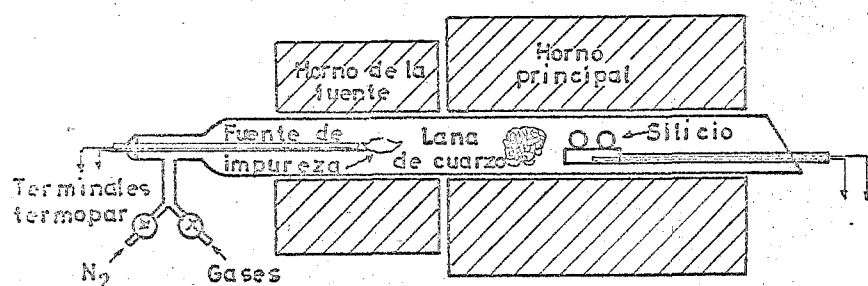


Fig. 58.7

donde se combina con el vapor de la fuente y es llevado a la región de alta temperatura donde reacciona con el semiconductor. Los compuestos más normalmente usados para las difusiones en silicio son  $As_2O_3$ ,  $P_2O_5$ ,  $BO_3H_3$ ,  $B_2O_3$  y  $Sb_2O_4$ . Estos óxidos reaccionan con el silicio dando lugar a una capa vitrea sobre la superficie de la que partirá la difusión al cristal. Además de actuar estas capas vitreas como fuente de impurezas, protegen al silicio contra la erosión superficial, absorben impurezas metálicas del silicio e impiden la difusión por la superficie de metales pesados y en particular sodio.

Una desventaja de los sistemas que emplean fuentes sólidas en su incapacidad para controlar concentraciones superficiales por debajo de la solubilidad de sólido. Un mayor control se realiza cuando se usan fuentes líquidas y mucho mejor aún con sistemas de fuentes en fase gaseosa.

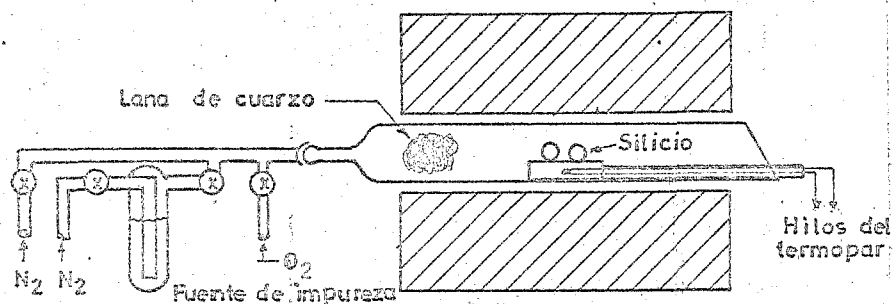


Fig. 58.8

mental, sino más como un compuesto: gaseoso, líquido o sólido. Cuando se emplea una fuente sólida se requiere, por lo general, un horno de dos zonas (Fig. 58.7): una zona de temperatura baja para obtener una presión de vapor suficientemente alta de la fuente y una segunda zona, de mayor temperatura, en la que se sitúa el semiconductor que va a ser difundido. Un flujo de gas inerte como argón o nitrógeno, se introduce en la zona de baja temperatura

Un horno de zona única (Fig. 58.8) es el que se requiere cuando se emplean fuentes líquidas ya que esta se mantiene a temperatura controlada próxima a la ambiente. Un gran control del flujo de gases es, sin embargo, esencial ya que la concentración de impurezas es no solamente función de la temperatura de la fuente,

sino también del flujo de gas portador inerte que pasa por la fuente. Los cálculos para la saturación del gas portador se hacen sobre la base de las leyes de los gases perfectos. El gas portador saturado se diluye con la corriente principal de gas, que es también un gas inerte mas un pequeño flujo de oxígeno. Fuentes líquidas comunes son  $\text{Cl}_3$ ,  $\text{OP}$ ,  $\text{Cl}_3\text{P}$ ,  $\text{Cl}_3\text{As}$ ,  $\text{Cl}_3\text{B}$  y  $\text{Br}_3\text{B}$ . El oxígeno reacciona con el cristal y el gas de la fuente para formar capas vitreas similares a las formadas por fuentes sólidas. La difusión evoluciona desde esta capa directamente al interior del cristal. Se puede hacer un cierto control sobre el contenido de impurezas de la capa vitrea por ajuste de los flujos de oxígeno y/o del gas de la fuente resultando en cambios del espesor de la capa y de su concentración.

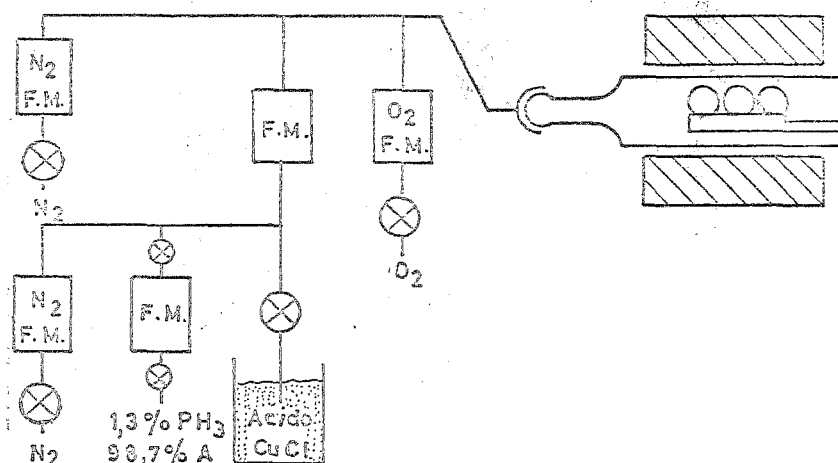


Fig. 58.9

Sistemas de fase gaseosa, Fig. 58.9 encuentran gran aplicación debido a su flexibilidad en términos de controlar la concentración superficial entre amplios márgenes. Igual que en el caso de fuente líquida, solo se requiere un horno de difusión de una única zona habiéndose de asegurar su buen control sobre el flujo de gas. Las fuentes de impurezas gaseosa, tales como  $\text{PH}_3$ ,  $\text{AsH}_3$ , o  $\text{B}_2\text{H}_6$  se suministran diluyendolas a baja concentración en un gas portador inerte. El gas es introducido simplemente en la corriente de gas portador junto con un pequeño flujo de oxígeno.

Velocidades comunes de flujo para sistemas de difusión de tubo abierto son el orden de 0,5 a 5 litros/min.

### 58.3 DIFUSION DE COMPONENTES ACTIVOS.

#### 58.3.1 TRANSISTORES NPN.

El transistor npn es, sin duda el componente básico de todo diseño. Una vez escogido, servirá como punto de partida para el resto del diseño y el dibujo del circuito. El resto de los componentes habrá de ser elegido o diseñado de forma que sea compatible con la estructura básica npn. La fig. 58.10 muestra una comparación entre las estructuras planares integrada y discreta de un transistor npn. En el

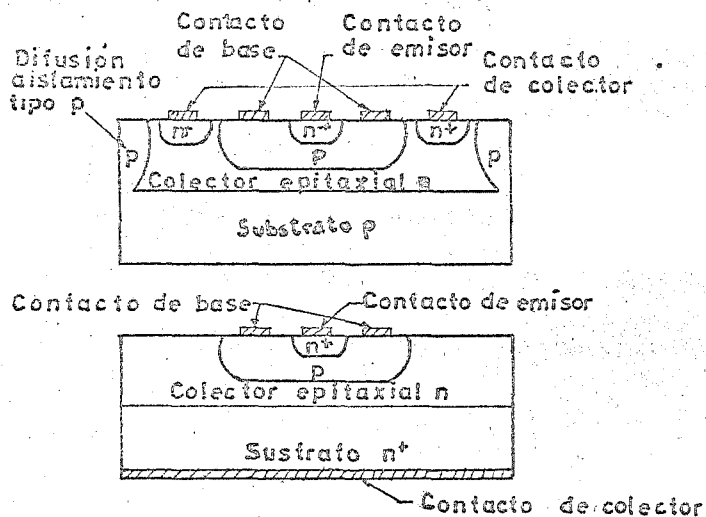


Fig. 58.10

el dispositivo integrado. Además, la presencia de la casilla de aislamiento por unión en torno al colector introduce dos parásitos adicionales en la estructura. Son estos, el diodo parásito sustrato - colector  $D_{ss}$ , y la capacidad asociada de la unión  $C_{ss}$ , como se ve en la Fig. 58.11. En ella, el transistor intrínseco, entre los terminales E, B y C es elásticamente equivalente al dispositivo planar discreto de la Fig. 58.10. Los valores de  $R_{CS}$  y  $C_{ss}$  dependen de la geometría lateral escogida y del trazado del dispositivo. La capa  $n^+$  subepitaxial en la estructura integrada tiene un propósito de

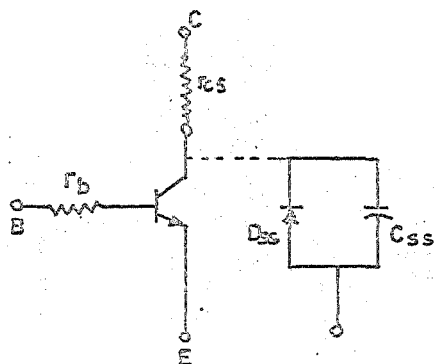


Fig. 58.11

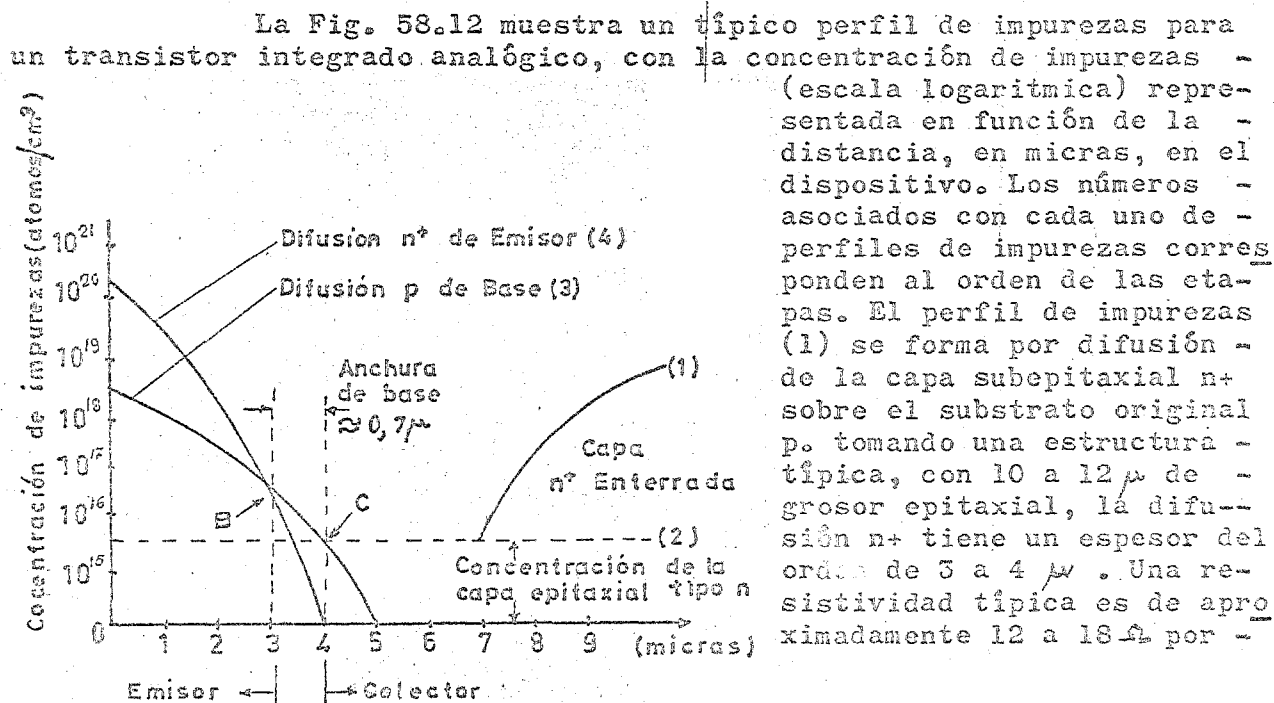


Fig. 58.12



cuadro. A fin de minimizar un excesivo perfil, se emplea un dopante de difusión lenta como As o Sb.

El perfil de impurezas (2) se forma epitaxialmente y constituye un soporte uniforme sobre el que se harán las difusiones de base y emisor. Para aplicaciones, por ejemplo, de circuitos analógicos, la resistividad de la capa n epitaxial se toma del orden de 0,5 a 5  $\Omega$ -cm ( $N_0 \approx 10^{16}$  átomos/cm<sup>3</sup> a  $N_0 \approx 10^{15}$  átomos/cm<sup>3</sup>). La elección de una resistividad de este valor viene determinada por consideraciones de ruptura base - colector).

El tener perfil de impurezas es la difusión tipo p de base. Esta etapa tiene normalmente una distribución gaussiana con una resistividad aproximada de 120 a 200  $\Omega$ /cuadrado. Como se verá después, los resistores difundidos y los transistores laterales pnp se forman en este ciclo de difusión.

El cuarto perfil es la difusión de emisor. Esta difusión usa normalmente fósforo como agente dopante, y se aproxima bastante a una distribución de función error complementaria con la concentración de la superficie mantenida cerca del nivel de solubilidad en sólido. Las uniones base-emisor y colector-base se forman donde interseccionan los correspondientes perfiles de difusión. La localización de estas uniones viene dada por los puntos (B) y (C) en la figura. La anchura W de la base es normalmente del orden de 0,3 a 0,6  $\mu$  con una tolerancia de  $\pm 0,1 \mu$ .

La Fig. 58.13 (a) muestra la planta de un transistor integrado npn de pequeña señal. El corte del mismo, normal a la superficie de la oblea, es el de la Fig. 58.13 (b).

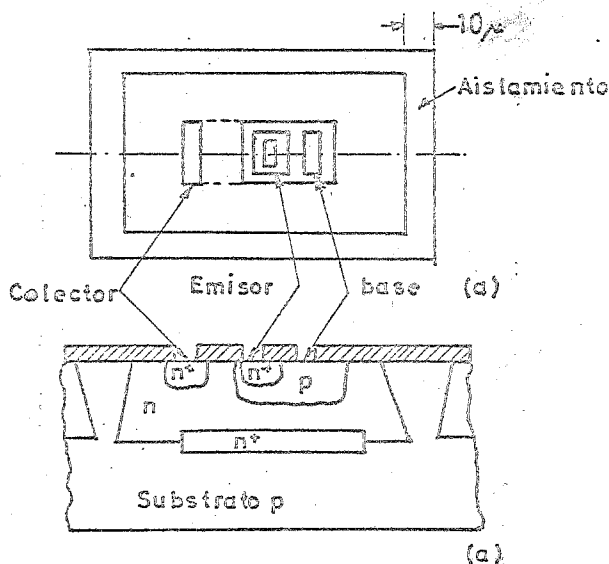


Fig. 58.13

El tamaño mínimo para las dimensiones laterales del dispositivo viene limitado por dos factores importantes: tolerancias de alineación de las máscaras y efectos de bordes de las difusiones.

La acción del transistor tiene lugar directamente debajo de la región de emisor. Por ello a fin de proporcionar la corriente de colector con una mínima de tensión serie, el contacto de colector se encuentra tan cerca del emisor como sea posible. La distancia entre la región de base y el contacto del colector se toma mayor que las difusiones laterales de las áreas de base p y colector n+ (ver Fig. 58.13). Si no se toma esta precaución, la región de colector

n+ puede alcanzar a la base. Para una unión típica esta separación es del orden de 15  $\mu$ . La capa subepitaxial n+ se encuentra localizada directamente por debajo de la región de base, llegando hasta el contacto del colector.

58.3.2 TRANSISTORES PNP.

Algunos circuitos pueden requerir el uso de transistores complementarios. En tales casos, es necesario fabricar transistores pnp sobre el mismo sustrato que los npn. Con este fin, han sido desarrollados un cierto número de estructuras monolíticas compatibles, total o parcialmente con el estándar npn. Algunos de estos serán los que veamos aquí.

A) PNP LATERAL

La estructura de transistor pnp mas simple es la lateral que tiene la característica de no requerir difusiones o máscaras adicionales. La Fig. 58.14 muestra la planta y el corte de un transistor de este tipo. La base de este dispositivo está formada por la capa epitaxial tipo n que servia de colector en los npn. La difusión de la base de los npn se emplea para formar el emisor y el colector del pnp lateral; la difusión n+ del emisor de los npn se emplea para formar la región de contacto n+ para la base del pnp. En una estructura tal como la anterior, la acción del transistor tiene lugar en dirección lateral, es to es, paralela a la superficie de la oblea. Los portadores minoritarios inyectados en la base se difunden lateralmente hacia la región del colector.

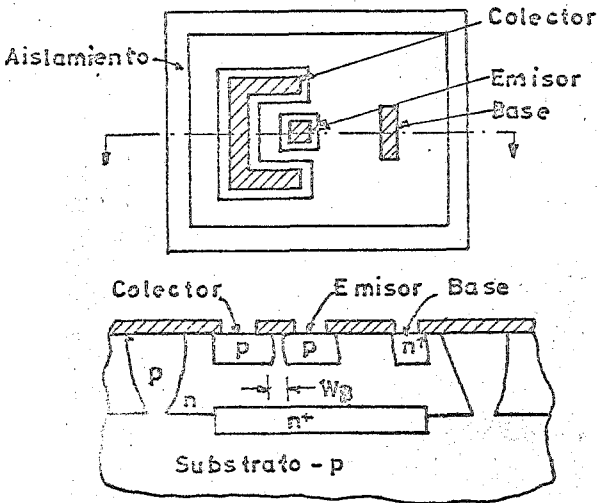


Fig. 58.14

El transporte de portadores a través de la región de base es mas eficiente cerca de la superficie del dispositivo, donde la separación entre colector y emisor es mínima. Esta separación mínima es la anchura efectiva de base  $W_b$ , que normalmente es del orden de 6 a 12  $\mu$ . Este valor es mucho mayor que en un transistor npn vertical ( $\approx 0,8 \mu$ ). Por ello su ganancia de corriente y su característica de respuesta con la frecuencia serán inferiores en pnp laterales que en npn.

B) PNP DE SUBSTRATO.

Un transistor pnp puede obtenerse también usando la región de base del npn como emisor, la capa epitaxial tipo n+ como la base y sustrato tipo p como colector. Tal tipo de dispositivo se denomina "pnp de sustrato" y tiene la estructura de la Fig. 58.15. Como puede verse, se fabricará al mismo tiempo que los transistores bipolares npn, sin requerimientos de nuevas máscaras o etapas de difusión.

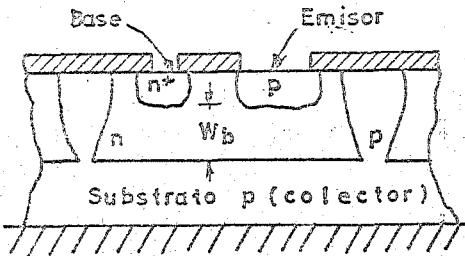


Fig. 58.15

El colector del pnp substrate en forma, como puede verse con el substrate tipo p común al resto del circuito encontrándose en todo momento conectado a masa para señales alternas. Por ello, este tipo de estructura solo podrá utilizarse cuando el circuito tenga su colector conectado a tierra no pudiendo así ser utilizado para amplificación de voltajes. Sin embargo vale para amplificación de corriente.

### 58.3.3 DIODOS INTEGRADOS.

Cualquiera de las uniones que existen en una estructura monolítica pueden ser usada como diodo. La Fig. 58.16 muestra los dos

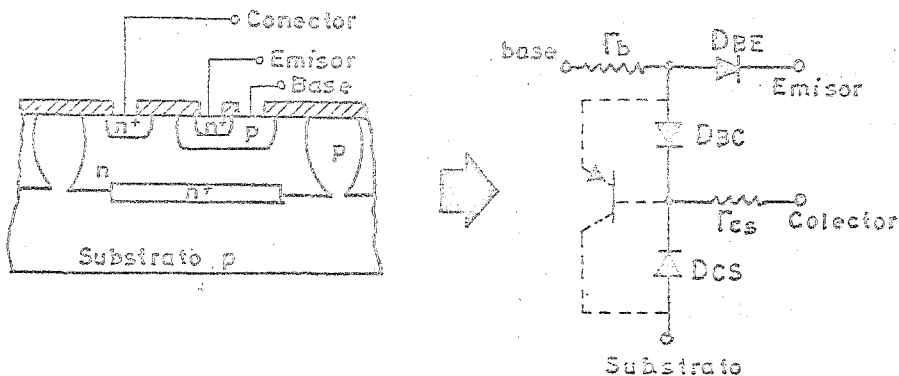


Fig. 58.16

diodos básicos asociados con un transistor npn integrado.  $D_{BE}$  y  $D_{BC}$  representan los diodos formados por las uniones emisor-base y colector-base,  $D_{CS}$  es el diodo colector-substrato. Los resistores  $R_b$  y  $R_{cs}$  representan las resistencias parásitas entre los terminales del dispositivo y las uniones reales de los diodos. Es conveniente hacer notar que se forma un transistor parásito pnp cuando el diodo  $D_{BC}$  está polarizado en directo y  $D_{CS}$  en inverso. Esto corresponde al transistor pnp de substrate que acabamos de ver.

Unicamente dos de estos diodos, el  $D_{BE}$  y el  $D_{BC}$  son aplicables a circuitos ya que el otro, el  $D_{CS}$ , tiene su cátodo común al resto del circuito.

Las cinco posibles configuraciones son las de la Fig. 58.17 que podemos designar así:

	Conexion diodo	Resistencia serie	Tension inversa de ruptura	p n p parasito
(1)		Pequeña ( $\approx R_b$ )	Baja ( $\approx 7V$ )	No
(2)		Pequeña ( $\approx R_{cs} + \frac{R_b}{\beta_0}$ )	Baja ( $\approx 7V$ )	No
(3)		Alta ( $\approx R_b + R_{cs}$ )	Alta ( $> 40V$ )	Si
(4)		Alta ( $\approx R_b + R_{cs}$ )	Alta ( $> 40V$ )	Si
(5)		Alta ( $\approx R_b + R_{cs}$ )	Baja ( $\approx 7V$ )	Si

Fig. 58.17

1. Unión base-emisor con colector abierto
2. Unión base-emisor con colector en corto con base
3. Unión colector-base con emisor abierto.
4. Unión colector-base con emisor en corto con base
5. Uniones base-emisor y base-colector en paralelo.

En esta figura pueden verse también las características y comparación de todas ellas de las que pueden obtenerse las consideraciones pertinentes.

#### 58.4 DIFUSION DE COMPONENTES PASIVOS

##### 58.4.1 RESISTORES DIFUNDIDOS.

En circuitos integrados, el resistor es, probablemente el componente que difiere mas, con respecto a un equivalente discreto, de todos los que aparecen. Usualmente, los resistores pueden incorporarse en circuitos integrados bien mediante técnicas de semiconductores, bien mediante otras de copa delgada. Aquí nos detendremos en los primeros ya que los segundos se verán cuando se trate de la tecnología de copas delgadas.

La técnica básica para obtener un resistor difundido es la utilización de la resistencia de un determinado volumen de silicio. Consideremos, por ejemplo, una barra de silicio con una resistividad  $\rho$ . La resistencia vendrá dada por

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

donde  $l$  y  $A$  son la longitud y la sección transversal de la barra, respectivamente. Resistores de este tipo pueden formarse en una de las regiones aisladas de la capa epitaxial sobre un sustrato típico. Sin embargo, es mucho más común emplear una difusión a través de una máscara, en el momento en que se están formando las regiones de emisor o de base de un transistor. Y ya que la difusión de emisor da lugar a una región de baja resistividad mientras que la de base lo da de resistividad media, esta última es la preferentemente usada por dar una fórmula de compromiso entre un alto valor de la resistividad que hacia un resistor más compacto y un bajo valor de la resistividad que origina un coeficiente de temperatura de la resistencia, bajo. La resistencia de un dispositivo así viene dado por

$$R = \frac{\bar{\rho} l}{X_j W}$$

donde  $\bar{\rho}$  = resistividad media de la región difundida  
 $l$  = longitud del área difundida  
 $W$  = anchura del área difundida  
 $X_j$  = profundidad de la difusión

El diseño real de un resistor difundido se simplifica utilizando el concepto de resistencia superficial definido por

$$R_s = \frac{\bar{\rho}}{X_j} \quad \Omega / \text{cuadro}$$

que llevado a la anterior da

$$R = R_s \frac{l}{W}$$

Ya que  $R_s$  queda determinada por los requerimientos de las difusiones de base o emisor, el diseño de un resistor monolítico de un valor dado se reduce a un simple problema geométrico. Así, para una determinada resistencia superficial  $R_s$ , el valor de un resistor difundido quedaría determinado únicamente por el cociente  $l/w$ , entre longitud y anchura, esto es, por razón de aspecto.

Como ejemplo, podemos determinar la razón de aspecto de un resistor de  $4000 \Omega$  fabricado durante la difusión de base con una resistividad de  $200 \Omega/\text{cuadro}$ :

$$\frac{l}{w} = \frac{R}{R_s} = \frac{4000 \Omega}{200 \Omega} = 20$$

Así, para este caso, podría fabricarse un resistor de  $4000 \Omega$  empleando un diseño de 20 mils de longitud por 1 mil de anchura o cualquier otro diseño de las mismas proporciones. (1 mil = 1 pulgada/1000).

La Fig. 58.18 ilustra el dibujo de la máscara de un resistor difundido típico con los valores dados en el ejemplo. Aquí, la resistencia total viene determinada por el área  $20 \times 1$  mil de la difusión tipo p de  $200 \Omega/\text{cuadro}$ . Los extremos de esta barra se agrandan a fin de poder albergar los contactos ohmicos. Habrá que agregar ciertos factores de conexión que no veremos aquí pero que pueden verse en la literatura. El borde de la región tipo n debe estar aproximadamente 2 mils separado del límite del área en que se encuentra el resistor a fin de conseguir una perfecta separación de la capa difundida de aislamiento tipo p.

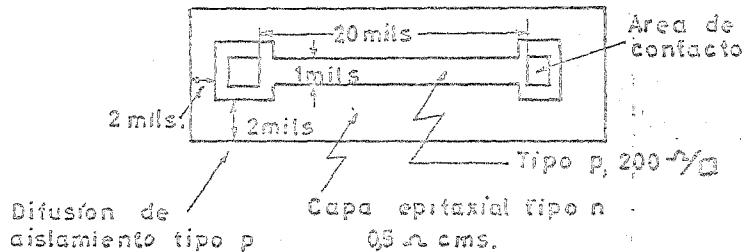


Fig. 58.18

la región tipo n debe estar aproximadamente 2 mils separado del límite del área en que se encuentra el resistor a fin de conseguir una perfecta separación de la capa difundida de aislamiento tipo p.

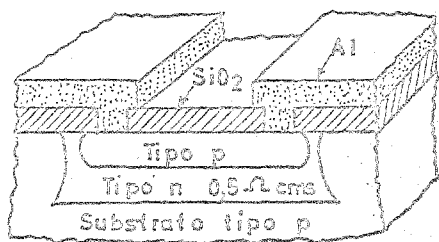


Fig. 58.19

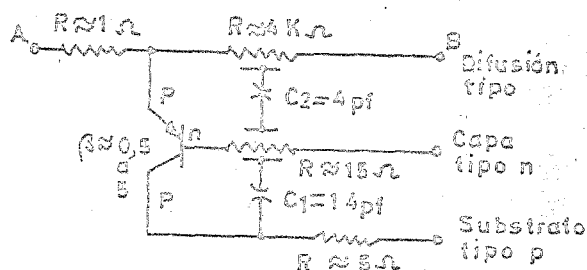


Fig. 58.20

La Fig. 58.19 muestra un resistor difundido monolítico típico en sección transversal. La Fig. 58.20, su circuito equivalente; Puede verse que un resistor monolítico produce, al mismo tiempo, una capacidad distribuida y un efecto de transistor distribuido. Así, la capa tipo n pasa a ser ahora la base de un transistor p-n-p de baja  $\beta$  (del orden de 0,5 a 5). Este bajo valor de  $\beta$  resulta de la base relativamente gruesa (aproximadamente 17 micras) formada por la capa epitaxial tipo n ante el substrato tipo p y el resistor difundido, también tipo p. Ya que el substrato se conecta normalmente al potencial más bajo del circuito, podría ocurrir conducción si la unión p-n entre el resistor y la capa epitaxial tipo n pasa a estar polarizada directamente bien por pérdidas o por

otros defectos. Como puede verse, entonces, cualquier corriente entre el sustrato y la capa tipo n estaría multiplicada por la  $\beta$  del transistor y actuaría como un shunt entre el resistor y el sustrato. En un circuito diseñado adecuadamente, la capa tipo n debería mantenerse al potencial positivo más alto del circuito a fin de prevenir tales efectos manteniendo una polarización inversa en la unión p-n entre el resistor y la capa tipo n.

Otros efectos parásitos asociados con los resistores difundidos son las capacitancias distribuidas de las uniones cuyos valores típicos, para un resistor de  $4000 \Omega$ , son los indicados en la Fig. 58.20. Los efectos de estas capacidades pasan a ser importantes para las altas frecuencias.

#### 58.4.2 CONDENSADORES DE UNIÓN.

intrínseca

Una unión p-n posee una capacidad como ya se sabe de la física de los dispositivos semiconductores, debido a la capa doble de carga iónica asociada con ella. No revisaremos aquí la teoría que explica dicha región pero si contaremos con ella a la hora de integrar condensadores. Revisemos brevemente las etapas en la fabricación de un condensador de unión en un circuito monolítico. La "condición de contorno" que aparece aquí es que el condensador ha de formarse simultáneamente con los otros elementos del circuito.

Básicamente la fabricación del circuito total, después de haber diseñado la secuencia adecuada de máscaras, comienza con una oblea de silicio tipo -p de 5 a  $10 \Omega \cdot \text{cm}$  sobre la que se ha crecido epitaxialmente una capa de 25 micras de espesor de silicio tipo n de  $0,5 \Omega \cdot \text{cm}$ . Esta capa epitaxial es cubierta a continuación con una fina película de óxido de silicio. La oblea es, a continuación, cubierta con una máscara y atacada tras lo cual se somete a una difusión de tipo p profunda que atraviesa completamente la capa epitaxial n hasta llegar al sustrato p. Con ello quedarán unas "islas" tipo n cubiertas de óxido completamente rodeadas de material tipo p. Se vuelve a hacer crecer de nuevo otra capa de óxido sobre las porciones difundidas de la oblea, con lo que la estructura resultante es la de la Fig. 58.21.

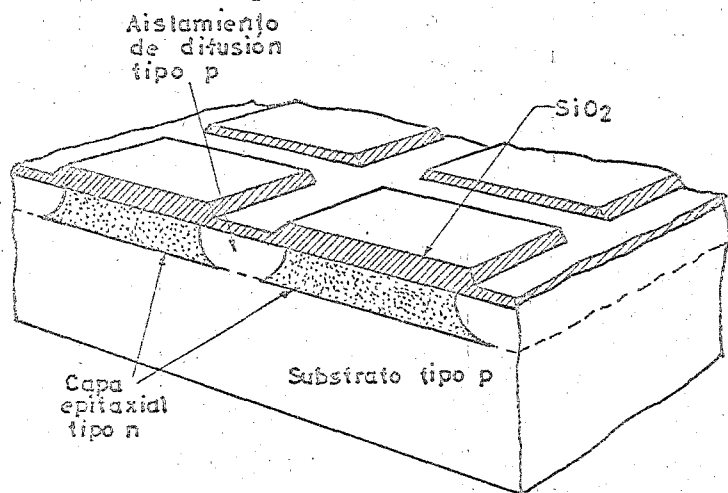


Fig. 58.21

el sustrato tienen la resistividad propia para las regiones de colector de los transistores, los ánodos de los diodos y para lo que mas interesa aquí, para una placa de un condensador de unión.

Se forman a continuación, en una segunda operación de difusión, las bases de los transistores, los resistores requeridos y el segundo elemento de los diodos y los condensadores de unión. Esta difusión es también tipo p, pero mucho mas tenue que la primera difusión de aislamiento que se realizó, no atravesando como aquella la capa epitaxial. Se forman así las uniones p-n requeridas directamente, en la capa epitaxial. De nuevo, las áreas difundidas son cubiertas con otra capa de óxido y con

Cada isla tipo p da base para las restantes difusiones que forman los varios elementos de un circuito integrado quedando reparados estos por uniones p-n-n-p, con lo que así se obtienen los adecuados aislamientos eléctricos. Las islas epitaxiales tipo n que aparecen así sobre

ello, a excepción de los contactos óhmicos de las dos placas del condensador, la fabricación del condensador de unión acaba. Los contactos óhmicos en las regiones difundidas tipo p y las regiones epitaxiales tipo n, que constituyen las placas del condensador, se formarán en un proceso que ya se vió en otro lugar.

Un corte de un típico condensador de unión es el de la Fig. 58.22 y en él pueden verse claramente las dos uniones asociadas con cualquier condensador difundido en un circuito monolítico. Cada una de estas uniones tiene una capacidad: la capacidad deseada de la unión J2 y la capacidad parásita J1. Ya que esta última aparece entre cualquier elemento de un circuito monolítico y el sustrato, existirá siempre un acoplo de tipo de capacidad parásita (consiste en la conexión en serie de las capacidad J1) entre dos cualesquiera de los elementos dispuestos sobre un sustrato común. Además de esto, cada condensador de unión tiene una resistencia parásita asociada en serie. Esta resistencia es el resultado de la resistencia de la región n.

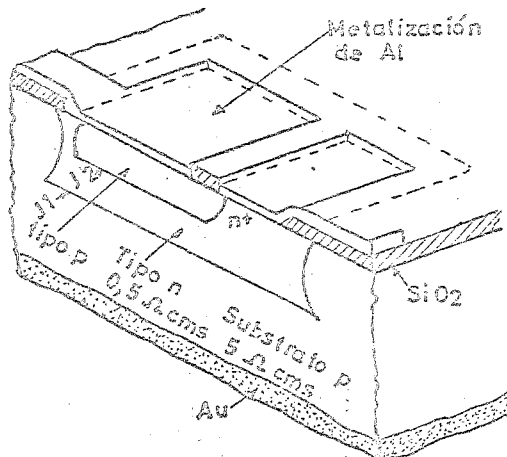


Fig. 58.22

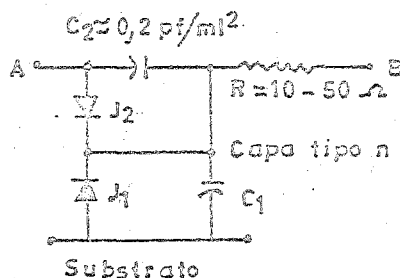


Fig. 58.23

Los elementos parásitos en un condensador de unión son los mostrados en la Fig. 58.23 que es su circuito equivalente. En él, C2 es la capacidad deseada, C1 la parásita y R la resistencia en serie. Los dos diodos "idealizados" de las dos uniones. De este circuito es evidente que será conveniente tener una relación entre C2 y C1 lo mayor posible a fin de obtener la máxima transferencia de señal del punto A al B.

El valor de capacidad que presentará una unión es, como ya se sabe de la Física de los dispositivos semiconductores, una función del área de la unión, de la concentración de impurezas en el material de mayor resistividad de los que forman la unión (en este caso la capa epitaxial tipo n) y de la tensión en dicha unión. No daremos aquí su demostración, que puede verse en cualquier libro de semiconductores, sino solo su valor final que es

$$C_0 = \sqrt{\frac{q \epsilon}{2 V} \left[ \frac{N1 \cdot N2}{N1 + N2} \right]}$$

donde  $\epsilon$  = constante dieléctrica del silicio

V = tensión en la unión

q = carga del electrón

N1, N2 = dopaje neto de cada lado de la unión.

Es evidente que el sustrato deberá situarse al potencial más negativo del circuito no solo <sup>para</sup> minimizar C1 sino también para prevenir paso de corriente por el diodo J1, y problemas asociados que puedan aparecer en el caso en que J1 pase a estar polarizado directamente.

#### CONSIDERACIONES GENERALES DEL DISEÑO DE CONDENSADORES DE UNIÓN.

De una forma global, algunos de los varios factores a tener en cuenta cuando se usen condensadores de unión en circuitos integrados, son los siguientes:

Primero, ya que el condensador se forma normalmente al mismo tiempo que la unión colector-base de un transistor que ocupe el mismo sustrato, su capacidad por unidad de area queda fijada por los requisitos del transistor.

Segundo, el condensador monolítico y el sustrato constituyen un transistor p-n-p. De aquí que la unión del condensador deba mantenerse en condiciones de polarización inversa para mantener al transistor sin conducir. (La unión del sustrato está siempre polarizada inversamente).

Tercero, la capacidad total es una función de la tensión a través de la unión. Por ello se tendrían modulaciones no deseadas en la capacidad si el circuito estuviera sujeto a variaciones de la tensión del condensador.

Cuarto, la resistencia en serie del contacto para el condensador difundido es aproximadamente la misma que para el colector del transistor, aproximadamente de 10 a 50 ohmios. Debido a este factor, la figura de mérito para este tipo de condensador es relativamente baja.

TABLA 58.1  
CAPACIDAD POR UNIDAD DE AREA

POLARIZACION EXTERNA (VOLS)	pF/mil <sup>2</sup>
0	0,2
-5	0,09
-10	0,06

La tabla 58.1 muestra una serie de valores típicos de la capacidad por unidad de area de este tipo de uniones en función de las condiciones normales de polarización y para un colector de 0,5 ohm-cm ( $1,2 \times 10^{16}$ /cm<sup>3</sup>).

TABLA 58.2  
VALORES TIPIICOS PARA CONDENSADORES  
DE UNION

CARACTERÍSTICA	VALOR
Cap. max. por unidad de area, pF/mil <sup>2</sup>	0,2
Area maxima, mil <sup>2</sup>	$2 \times 10^3$
Maxima capacidad, pF	400
Tensión ruptura, vols	5 ó 20
Q	1 - 10
Tolerancia %	± 20

La tabla 58.2 da idea de una serie de valores típicos para condensadores de unión, que son los más normales en los actualmente en uso. La tensión máxima de ruptura viene determinada por la concentración de impurezas del material de la parte dopadamas debilmente de la unión.



## TECNICAS DE AISLAMIENTO DE COMPONENTES.

Ya que todos los componentes de un circuito integrado son fabricados simultaneamente y sobre el mismo sustrato de silicio, es necesario emplear algún método de aislamiento eléctrico entre ellos. Esto se consigna mediante la formación de los dispositivos monolíticos en el seno de regiones aisladas electricamente conocidas como casillas o receptáculos. La separación eléctrica entre cada casilla y el resto del circuito se consigna generalmente por dos métodos: mediante uniones polarizadas inversamente (aislamiento por unión) o por capas de barreras dieléctricas (aislamiento dieléctrico). Estudiaremos aquí las técnicas de fabricación y las propiedades eléctricas asociadas con cada uno de estos métodos de aislamiento.

### AISLAMIENTO POR UNION.

Las técnicas de aislamiento por unión son, con mucho, las más económicas y por ello, las más comúnmente utilizadas en la fabricación de circuitos monolíticos. En ellas, el aislamiento eléctrico se consigue mediante las propiedades de bloqueo de corriente de una unión p-n polarizada inversamente. La Fig. 58.24 muestra la sección de corte de una casilla con un transistor bipolar npn.

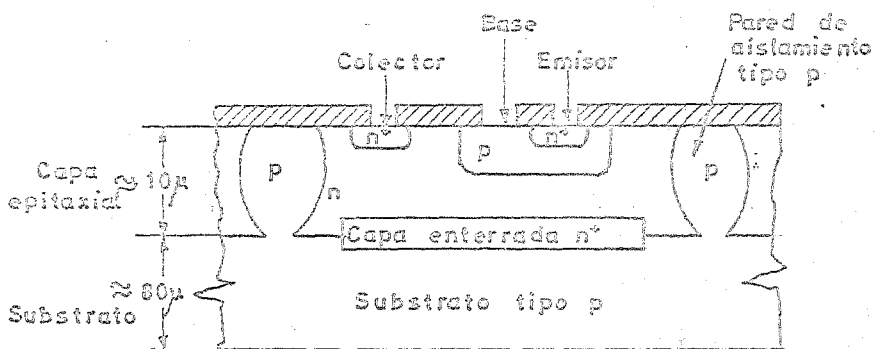


Fig. 58.24

conducción de corriente, desde el contacto físico del colector en la superficie de la oblea a la región activo del colector inmediatamente por debajo de la región de base.

A continuación de la etapa epitaxial y una de oxidación de la superficie se aplica una "máscara de aislamiento" sobre la superficie de la oblea. Esta máscara consta de unas ventanas que dibujan las zonas de aislamiento a través de las cuales se procede a una difusión tipo p, atravesando la capa epitaxial tipo n hasta llegar al sustrato tipo p. Con ello se forma un cerco continuo de semiconductor tipo p en torno a la capa epitaxial n y sobre la cual, por difusiones sucesivas, se constituirán los sucesivos elementos de los dispositivos que allí se formen. Cuando se polarice inversamente el sustrato y la franja p que bordea a la casilla n con respecto a esta, se habrá creado una barrera que actuará de aislamiento eléctrico con respecto al resto de la oblea.

La difusión p que crea el aislamiento es una difusión relativamente poco crítica, con el único requisito de que sea más profunda que la capa epitaxial formada. El único inconveniente que puede presentarse es cuando esta capa epitaxial se requiere que sea bastante gruesa. Entonces el tiempo necesario para hacer la difusión puede llegar a ser relativamente grande con el consiguiente detrimento de algunas de las características del dispositivo.

Un método análogo puede encontrarse en los casos en que no se realiza crecimiento epitaxial sobre el sustrato sino que sobre esta, directamente, se procede a las difusiones que den lugar al colector emisor y base. Las casillas quedan entonces formadas de forma directa aunque como se verá en su momento aparecen inconvenientes en este método que hacen mas aconsejable el anterior.

#### AISLAMIENTO DIELECTRICO.

En algunas aplicaciones, las capacidades parásitas de la unión o las corrientes de pérdidas asociadas con los métodos de aislamiento por unión pueden no ser aceptables. En tales casos, puede obtenerse un

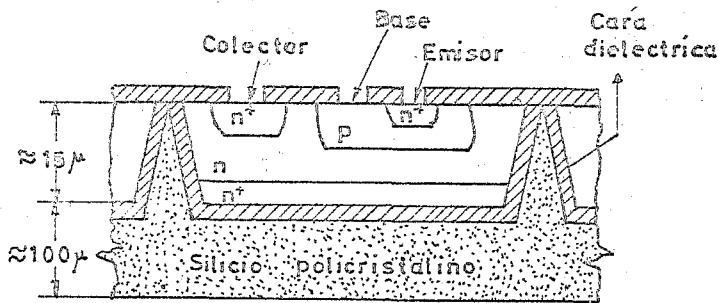
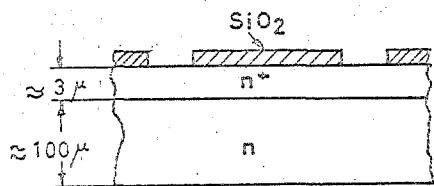
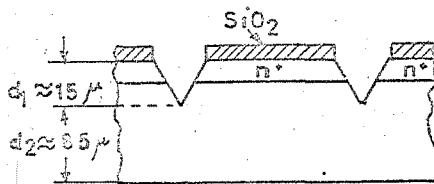


Fig. 58.25

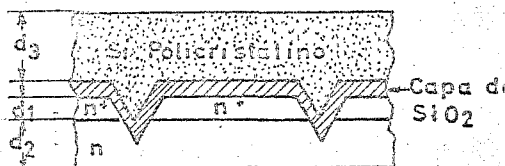
58.26 muestra una secuencia del proceso mas comunmente empleado. Partiendo de un sustrato tipo n, se efectúa la difusión no selectiva de una capa n+



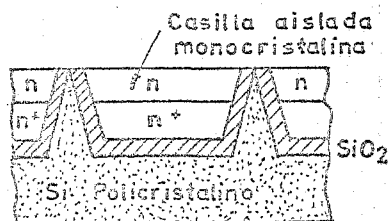
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 58.26

aislamiento eléctrico superior mediante la reparación de cada casilla por una capa dieléctrica como la de la Fig. 58.25. Normalmente, SiO2 crecido térmicamente se emplea como material dieléctrico.

En la formación de casillas aisladas dieléctricamente en la superficie de una oblea, pueden emplearse un cierto número de técnicas. La Fig. 58.26 muestra una secuencia del proceso mas comunmente empleado. Partiendo de un sustrato tipo n, se efectúa la difusión no selectiva de una capa n+ sobre la superficie de la misma. El material de partida es ahora uno orientado en la dirección  $\langle 100 \rangle$  en lugar de en la  $\langle 111 \rangle$  como era, normalmente, en los casos anteriores. (La razón de elegir casi siempre sustratos orientados según  $\langle 111 \rangle$  es la de que es más fácil crecer cristales libres de defectos en esta dirección que en cualquier otra, con la consiguiente economía). Las razones de esta elección se verán mas adelante.

A continuación de la difusión n+, se oxida la superficie de la oblea aplicando una máscara con las zonas opacas correspondientes a las regiones donde van a aparecer los aislamientos. Se ataca seguidamente con una solución de hidróxido potásico (KOH) que tiene la propiedad de actuar anisotrópicamente sobre la superficie libre de silicio, esto es, la velocidad de ataque es mucho mayor según los planos  $\{111\}$  que según los  $\{100\}$ .

Este ataque preferencial da lugar a la formación de un surco en forma de V sobre la superficie de la oblea, como se ve en la Fig. 58.26b.

La Fig. 58.27 muestra un detalle del surco de aislamiento en silicio orientado en la dirección  $\langle 100 \rangle$  por ataque preferencial según los planos  $\{111\}$ . El proceso de ataque se detiene cuando los dos

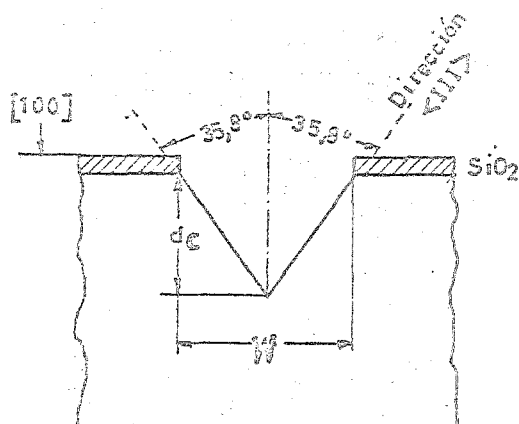


Fig. 58.27

planos  $\{111\}$  que delimitan el surco de aislamiento intersectan en un punto a la profundidad  $d_c$  por debajo de la superficie. Ya que los planos  $\{100\}$  y  $\{111\}$  forman entre sí un ángulo de  $35,8^\circ$ , la profundidad  $d_c$  del surco puede determinarse en función de la anchura inicial de la zona sin oxidar  $W$  como

$$d_c = \frac{W}{2} \frac{1}{\tan 35,8^\circ} = \frac{W}{\sqrt{2}}$$

Volviendo a la Fig. 58.26 (b), hemos de señalar que las dimensiones verticales de los dibujos no están en escala y así la profundidad  $d_c$  del surco de aislamiento es una pequeña fracción del grosor total de la oblea.

Una vez finalizada la etapa de ataque preferencial, el silicio que quedó al descubierto es oxidado de nuevo una gruesa capa de silicio policristalino es depositado sobre la capa de óxido, según puede verse en la Fig. 58.26 (c). El grosor y las características eléctricas de esta capa de silicio policristalino no tienen ninguna importancia ya que su función principal es servir como soporte mecánico para la oblea.

A continuación, la oblea original es volteada, correspondiendo ahora la parte superior de la estructura del dispositivo a la superficie inferior en la Fig. 58.26 (c). Una vez hecho esto, se pule la capa de monocristalino a un grosor  $d_2$  hasta que apoya en la superficie de la oblea las figuras de aislamiento resultando así una casilla de monocristalino aislada como la de la Fig. 58.26 (d).

Después de que se han formado las casilla aisladas, la fabricación de los dispositivos integrados en cada una se completa por una serie de enmascaramientos convencionales y etapas de difusión dando lugar, por ejemplo a la estructura aislada de la Fig. 58.25.

La secuencia básica de las etapas del proceso son conocidas desde hace bastante tiempo, pero solo ha sido práctica después del desarrollo de las técnicas de ataque anisotrópico que permiten un control muy exacto de las profundidades del surco.

## 59. TECNOLOGIAS COMPLEMENTARIAS EN LA FABRICACION DE C.I'S.

### 59.1 FOTOLITOGRAFIA.

El dibujo inicial de un circuito integrado se hace normalmente a una escala que es normalmente varios cientos de veces mayor que las dimensiones que tendrá el circuito final. Este dibujo inicial se descompone entonces en varias máscaras individuales, cada una de las cuales corresponden a una etapa de enmascaramiento del proceso de fabricación. Las máscaras individuales son a continuación reducidas fotográficamente a las dimensiones finales de la unidad integrada. La forma reducida de cada una de estas figuras se imprime por contacto sobre una película fotográfica para formar una "máscara" fotográfica de los dibujos que vayan a formarse por ataque de la superficie de  $\text{SiO}_2$ . A fin de facilitar una producción en cantidad, se imprimen sobre la misma transparencia un gran número de tales máscaras formando una "placa de enmascaramiento". La placa es lo suficientemente grande como para cubrir por completo la superficie de la oblea de silicio que vaya a ser procesada. Con ello, con una sola operación, se conseguirá obtener un gran número de circuitos idénticos.

Durante la operación de enmascaramiento, la máscara es transferida de la placa a la superficie de la oblea mediante técnicas de fotografía. La superficie de la oblea que va a ser enmascarada se cubre inicialmente con una película fotosensible denominada "fotorresina" o "resina". La superficie de la oblea cubierta de resina se pone entonces en íntimo contacto con la placa de enmascaramiento y expuesta a luz ultravioleta. Las partes de resina fotosensible no cubiertas por partes opacas de la máscara se polimerizan endureciéndose como resultado de la exposición. A continuación, las partes sin exponer pueden lavarse dejando una "máscara de fotorresina" sobre la superficie de la oblea. Como consecuencia de esta etapa de enmascaramiento, la figura que va a dibujarse en el óxido es transferida a la superficie de la oblea en la forma de un dibujo de foto-resina endurecido y resistente al ataque.

La etapa de fotoenmascaramiento es seguida por una etapa de ataque durante la cual, las partes de la capa de  $\text{SiO}_2$  no protegidas por la máscara de resina expuesta son eliminadas por ataque, formando las ventanas de difusión en el óxido. Este proceso, es usado como atacante una solución de ácido fluorhídrico. A continuación de la etapa de ataque, es eliminada la foto-resina mediante una solución especial de lavado y la oblea de silicio está lista para la próxima etapa de difusión. Una etapa de fotoenmascaramiento similar se usará también para formar los caminos de las conexiones.

#### 59.1.2 TOLERENCIA DIMENSIONAL.

En la mayor parte de las estructuras monolíticas, las dimensiones laterales de los componentes integrados vienen determinados por las limitaciones de la reducción fotolitográfica, del enmascaramiento y de los procesos de ataque. Las dos limitaciones fundamentales del proceso de fotolitografía son el alineamiento y la resolución de los dibujos de las máscaras.

Ya que las etapas de la fabricación de circuitos monolíticos requieren aplicaciones sucesivas de un cierto número de máscaras, es necesario que cada nueva máscara aplicada sobre la superficie del silicio, está perfectamente alineada con las máscaras previas, en la superficie total de la oblea. Esto requiere un alto grado de exactitud dimensional asociada con el dibujo inicial del circuito. Para asegurar esta

exactitud, el diseño inicial se efectúa al tamaño mayor posible, dentro de las posibilidades del sistema de fotorreducción. Se prefiere típicamente un tamaño X500 como diseño inicial para aquellos circuitos cuyas dimensiones finales serán de aproximadamente  $0,44 \text{ mm}^2$  ( $\sim 70$  mils cuadradas). Para mayores dimensiones del "chip" se suele comenzar por una dimensión menor, tal como X400, a fin de evitar distorsiones ópticas durante el proceso de fotorreducción. Hay que hacer notar que inexactitudes en el dibujo asociadas con el diseño original se reducen también en la misma escala como el diseño original. Así por ejemplo, una inexactitud dimensional de  $0,01 \text{ cm}$  en el original conduce a un error de  $\pm 0,2 \mu$  en la dimensión final, con una reducción de X500.

Una posible fuente de error en la etapa de enmascaramiento es la tolerancia asociada con el proceso de "repetitivo" ("step and repeat") para imprimir por contacto la distribución de máscaras sobre la placa de enmascaramiento. La fuente de error en este caso es el mecanismo de avance. Un factor adicional que limita las tolerancias de la alineación de un conjunto de máscaras es la presión del posicionado de la máscara sobre la superficie de la oblea. A fin de minimizar los errores de alineación en la etapa de la operación de enmascaramiento es normal usar figuras de alineación concéntrica en sucesivas máscaras. La exactitud de alineamiento para un típico conjunto de máscaras es de aproximadamente  $\pm 1 \mu$ .

La propiedad de la máscara para reproducir pequeños detalles sobre la superficie de la oblea queda determinada por la resolución de la etapa de fotoenmascarado. Una buena medida de la resolución es la mínima anchura de línea necesaria para resolver, repetitivamente, dos líneas paralelas separadas una línea entre sí. Las limitaciones principales del poder de resolución de las técnicas de foto-enmascarado son las fluctuaciones estadísticas en la estructura molecular de las emulsiones fotográficas y la difracción de la luz en los bordes de la máscara. En la actualidad la mínima anchura de línea que puede ser resuelta es aproximadamente  $2 \mu$ .

La etapa de ataque introduce también irregularidades aleatorias que tienden a reducir la resolución de la máscara. La estructura en granos de la fotoreolina expuesta y polimerizado no define un verdadero perfil durante la etapa de ataques, sino que puede causar irregularidades aleatorias del orden de  $\pm 0,5 \mu$  en las líneas rectas. Este defecto, junto, con las propiedades no uniformes del ataque sobre las capas de óxido tiende a redondear las esquinas de las máscaras con un radio típico de 2 a  $3 \mu$ .

La tolerancia de alineamiento y de resolución limitan así las dimensiones laterales de los componentes de los circuitos integrados. Para una etapa de enmascaramiento dada, los valores absolutos de las tolerancias dimensionales son constantes. Por ello, las tolerancias son peores según hagamos menores las dimensiones. Por ejemplo, la similitud de dos resistores de  $5 \mu$  de anchura es mucho peor que la de otros que tengan  $10 \mu$ .

## 59.2 FORMACION DE CONTACTOS OHMICOS.

Las difusiones vistas en anteriores apartados pueden dar lugar a estructuras con las características eléctricas deseadas. Utilizar las, sin embargo, lleva consigo la formación de contactos en varias partes de las mismas. Ya que se ha encontrado poco práctico la unión de hilos directamente al silicio, siempre se hará intervenir una película de metal. Las propiedades deseadas de esta película de metal son las siguientes:

1. Debe ser capaz de hacer un buen contacto (no rectificador) con el semiconductor.
2. Debe ser un excelente conductor.
3. Debe tener propiedades metalúrgicas adecuadas a los procedimientos de conexión de los terminales que se emplean.

Varios metales se han ensayado para la formación de estos contactos óhmicos. Los más comunes son oro, aluminio, níquel, plata, plomo y cromo. En los dispositivos de silicio, el que se ha encontrado preferible es el aluminio. Sin embargo, cuando se usa aluminio ha de tenerse gran cuidado para evitar la formación de una región tipo p que puede ocurrir cuando se mezcla aluminio en el silicio. El fenómeno de recrecimiento, que origina este problema, puede comprenderse con la ayuda de la Fig. 59.1 que muestra el diagrama de la aleación aluminio-silicio.

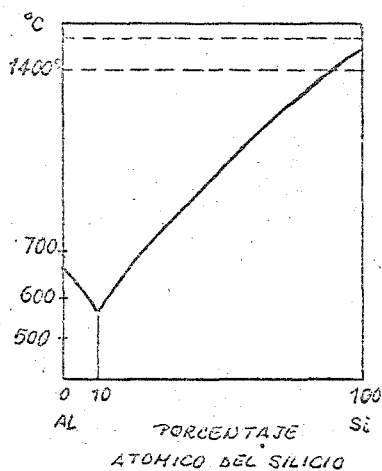


Fig. 59.1

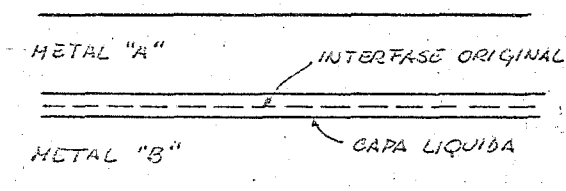


Fig. 59.2

Como puede verse, una aleación compuesta de un 89% de Al y 11% de Si tienen el punto de fusión más bajo que cualquier otra aleación de estos metales. Este punto mínimo se denomina eutéctico y no constituye un compuesto químico real.

La Fig. 59.2 es una representación esquemática de lo que ocurre en la interfase cuando se calientan dos metales a una temperatura un poco por encima del punto eutéctico. Según nos aproximamos a la temperatura crítica, átomos de cada uno de los dos metales comienzan a difundirse por la interfase. Cuando se alcanza el punto eutéctico, se forma una capa líquida muy delgada en la interfase y esta fase líquida disuelve rápidamente am-

bos metales en la proporción adecuada para formar un gran volumen de aleación eutéctica. Si se dispone de una cantidad limitada de uno de los dos metales, el proceso cesará cuando la cantidad total del material limitado ha sido gastado. Esta es la situación, por ejemplo, cuando se deposita una película de aluminio del orden de una micra de espesor sobre un sustrato de silicio que tenga un espesor de unos cuantos cientos de micras de espesor.

Cuando el sistema se calienta más allá de la temperatura eutéctica (576°C) todo el aluminio presente rápidamente queda absorbido por la fase líquida. El aluminio, en este caso, es el factor limitador por ser el espesor de su película mucho menor que el de la región de silicio y ya que la aleación eutéctica requiere un porcentaje mucho mayor de aluminio que de silicio.

mucho mayor Si ahora, un sistema así es calentado a una temperatura que la eutéctica, más y más silicio se disolverá en la fase líquida como puede verse en el diagrama de fases. Si el sistema se enfría luego a

un punto por debajo del eutéctico, este silicio adicional es rechazado del líquido durante el enfriamiento, formando una "capa recrecida" de silicio en la interfase. Esta capa recrecida contiene un pequeño porcentaje de aluminio, como puede determinarse de la solubilidad sólida de aluminio en silicio (aproximadamente 0,001 por ciento). La aleación líquida aluminio-silicio se solidificará formando un contacto óhmico en el silicio, siempre que el silicio original sea bien tipo p o bien tipo n fuertemente dopado. Si es tipo p del que se parte, no hay dificultad ya que el aluminio que se segregará a la capa recrecida tenderá a hacerla más tipo p. Si es tipo n del que se parte, habrá entonces más átomos tipo n que átomos del aluminio tipo p por unidad de volumen en el cristal recrecido; de otra forma se creará una unión p-n en la interfase entre la capa recrecida y el silicio original sin perturbar. La cantidad de aluminio presente en la capa recrecida es de aproximadamente  $5 \times 10^{18}$  átomos/cm<sup>3</sup>. Así, a menos que haya impurezas tipo n presentes en la capa recrecida en exceso de esta concentración, se formará un contacto rectificador.

El aluminio es útil como contacto óhmico para las regiones de base y de emisor en los transistores n-p-n. En estos dispositivos, el dopaje de base puede ser menor que  $5 \times 10^{18}$  átomos/cm<sup>3</sup>, pero es ya tipo p. El emisor es tipo n, pero su dopaje es normalmente del orden de  $10^{21}$  átomos/cm<sup>3</sup>. En un transistor p-n-p, el contacto de emisor no es, de nuevo, problema ya que es, al mismo tiempo p y está fuertemente dopado. Sin embargo, el dopaje de base puede ser menor que  $5 \times 10^{18}$  átomos/cm<sup>3</sup> y ya que es tipo n, el uso de aluminio dará lugar normalmente a un contacto rectificador. Esto puede eliminarse, como puede verse en la Fig. 59.3, realizando una difusión de reforzamiento n<sup>+</sup> antes de la metalización.

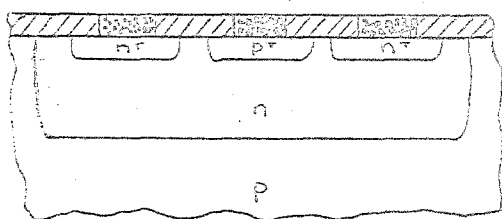


Fig. 59.3

En la práctica, una secuencia típica de metalización es como sigue.

Después de que todas las difusiones han sido efectuadas, mediante la técnica conocida de fotoresina, son realizadas aberturas en el óxido donde han de efectuarse los contactos óhmicos.

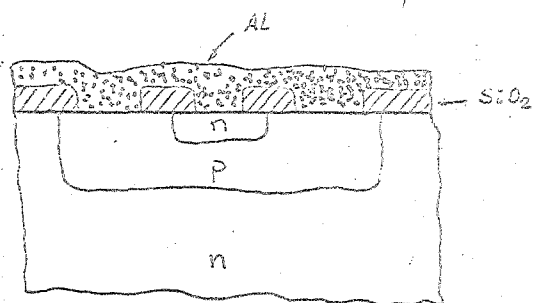


Fig. 59.4

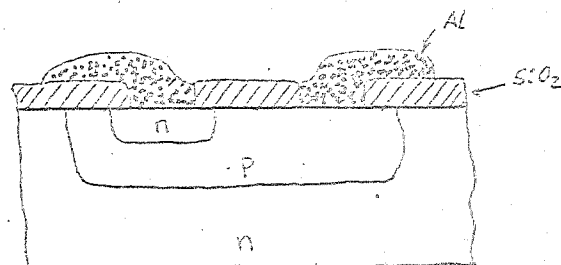


Fig. 59.5

Las obleas son entonces lavadas y colocadas en un aparato de evaporación al vacío. Las obleas limpias y atacadas son dispuestas bajo un filamento de tungsteno en la campana de vacío y el metal con el que se va a efectuar el contacto óhmico es arrollado en torno al filamento de tungsteno. Después de haberse conseguido el vacío en la campana, el aluminio es primero fundido y después evaporado por el filamento calefactor. Se depositará entonces una película fina de aluminio sobre las obleas así como sobre las restantes del sistema.

Después de que el metal haya sido evaporado, la campana es vuelta a llenar de aire y se retiran las obleas. En este

momento, las obleas aparecen en sección transversal como puede verse en la Fig. 59.4. Las obleas metalizadas son cubiertas de nuevo con fotorresina y expuestas con una nueva máscara que es esencialmente la inversa de la anterior. La resina es entonces activada. Una vez hecho esto, un atacante adecuado, como por ejemplo hidróxido sódico, es usado para eliminar el aluminio de las zonas no deseadas. El metal es, a continuación, aleado en la superficie del silicio calentando las obleas a una temperatura por encima de la eutéctica.

### 59.3 UNION DEL CHIP Y DE LOS TERMINALES.

#### 59.3.1 UNION DEL CHIP.

Los chips de microcircuito poseen un tamaño comprendido entre 20x20 mils y 80x200 mils. Estos chips se encuentran unidos a un soporte recubierto de oro mediante una preforma eutéctica de oro-germanio (88% Au-12% Ge en peso). Como puede verse en la Fig. 59.6 esta preforma se coloca entre el

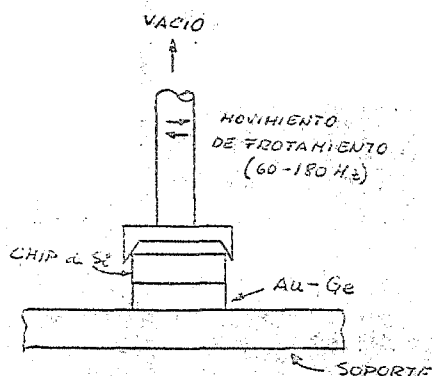


Fig. 59.6

soporte y el silicio. La temperatura de la combinación se eleva de 390 a 400°C aplicándose a continuación una presión al chip junto con un movimiento vibratorio de frotamiento. Ocurre entonces la fusión del eutéctico resultando una unión Au-Ge-Si al enfriarse.

En algunas aplicaciones, en que se requiere un buen contacto óhmico pueden usarse preformas dopadas con 0,1% de galio o antimonio para contactos  $p^+$  y  $n^+$  respectivamente. En muchos microcircuitos, sin embargo, este contacto no tiene misión eléctrica alguna.

Un sistema oro-silicio del tipo mostrado en la Fig. 59.1 puede usarse también. Sin embargo, el sistema oro-germanio posee mejores características de mojado por lo que es preferida.

#### 59.3.2 UNION DE LOS TERMINALES.

A fin de conectar los extremos de conexión a las patillas terminales, se utilizan hilos de oro o de aluminio, de entre 0,5 y 0,2 mils de diámetro. Los hilos de oro suelen ser 99,999% puros de oro, trabajados de forma que tengan la suficiente dureza para las necesidades de manejo. Con aluminio, sin embargo, es necesario utilizar una aleación de 99% de Al y 1% de Si para dar la misma dureza.

##### 59.3.2.a UNION POR TERMOCOMPRESION.

El oro se suelda al silicio de forma rápida mediante la aplicación simultánea de calor y presión. De los muchos tipos de equipos de soldadura disponible, el soldador de "cabeza de clavo" es quizás el más común. La Fig. 59.7 muestra las diferentes etapas de su forma de trabajo. Un hilo de oro con un extremo en forma de esfera se hace por un capilar cuyo diámetro es ligeramente mayor que el hilo a soldar.



La esfera se situa sobre el terminal de conexión del chip y se desciende hasta ponerse en contacto con el mismo. Durante este proceso, el chip de semiconductor, montado sobre su soporte, se mantiene a una temperatura de 280° a 300° en atmósfera de nitrógeno. La esfera de oro se oprime contra el terminal durante unos breves segundos hasta que se reblandece. De resultas de ello, la esfera adquiere la forma de una cabeza de clavo, de ahí el nombre de este tipo de unión. Se eleva a continuación el capilar quedando un pequeño bucle de hilo de oro que se lleva, por movimiento del capilar, sobre el poste terminal de la patilla correspondiente repitiéndose el proceso. Finalmente, mediante un mechero de hidrógeno se corta el hilo resultando dos esferas en cada una de las dos partes resultantes. Con ello, el hilo queda listo para la próxima operación de soldadura. La Fig. 59.7 muestra las dimensiones típicas del hilo, de la cabeza de clavo y de la esfera formada en este proceso. Una desventaja de este tipo de unión es la presencia de la "cola" de canchales formada con cada unión. Bajo condiciones de vibración extrema, esta cola puede romperse con una causa incipiente de fallo del circuito.

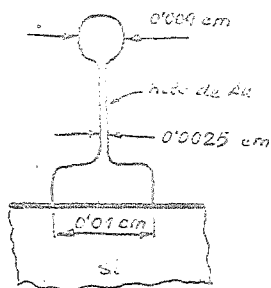


FIG. 59.7

#### 59.3.2.b UNION POR ULTRASONIDOS.

Los métodos ultrasónicos han encontrado aplicación adecuada para unir los hilos de aluminio a los terminales del microcircuito.

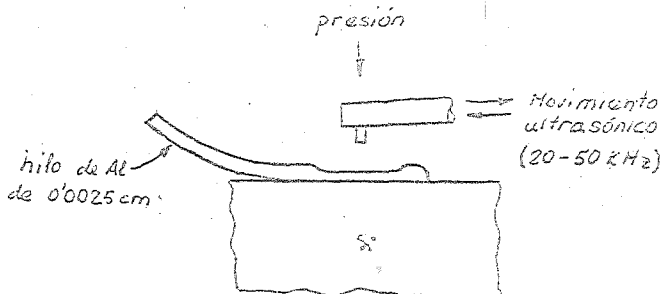


FIG. 59.8

La operación de unión se realiza como puede verse en la Fig. 59.8. En este caso, el hilo se coloca en contacto con el terminal de aluminio aplicándole con una punta roma una cierta presión al mismo tiempo que se mueve esta con un movimiento de frecuencia ultrasónica. La soldadura ocurre en cuanto la capa de  $Al_2O_3$  se rompe por las vibraciones ultrasónicas.

La unión ultrasónica se realiza a temperatura ambiente y es, notoriamente, un proceso

mucho más sencillo. Sin embargo, su éxito parece ser una mezcla del nivel la presión y de la potencia de ultrasonidos, por lo que en cierta forma es difícil de optimizar. La unión por termocompresión, por el contrario, es una técnica mucho más fácil.

#### 59.4 ENCAPSULADO.

Varias tecnologías de encapsulación han sido desarrolladas a fin de compaginar los requerimientos de economía, comportamiento y fiabilidad necesarios en este tipo de componentes. Cuatro son las tecnologías más comúnmente empleadas y son las que brevemente, veremos aquí.

El soporte TO-5 está compuesto de un cierto número de patillas de alambre, una base metálica y un molde vítreo; después de su montaje, es soldada la caperuza. Este tipo de soporte es, de hecho, el más conocido ya que es análogo al metálico usado en los transistores (Fig. 59.9).

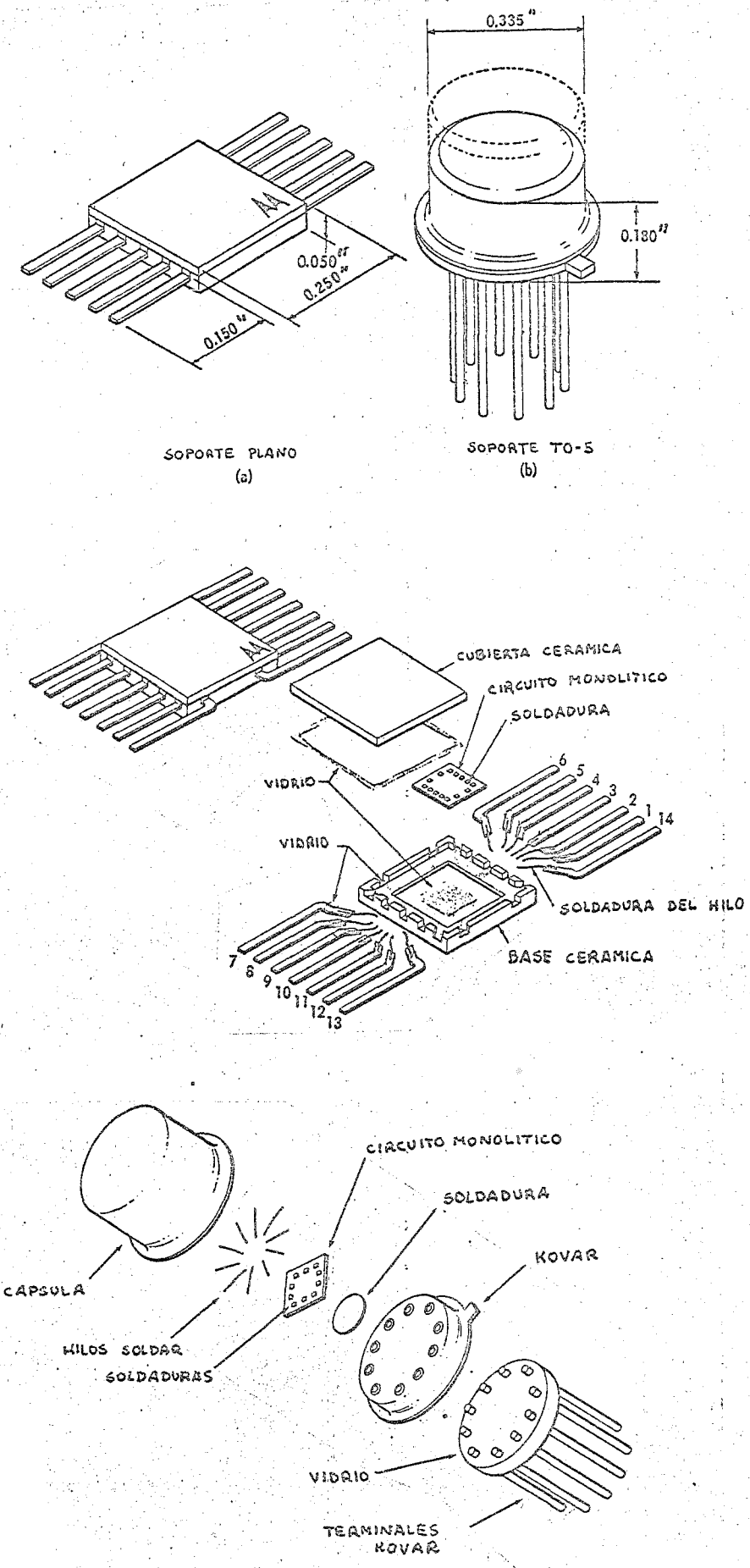


FIG. 59.9

Los tipos cerámicos dual en línea y plano emplean una moldura metálica provista de las correspondientes patillas colocada entre una base y una armadura cerámica, siendo después utilizado el conjunto. Finalmente se coloca una cubierta cerámica que se une fundiendo su envoltura vítrea.

El tipo plástico dual en línea consiste solamente en una moldura metálica provista de las correspondientes patillas, colocada entre una base y una armadura cerámica siendo después vitrificado el conjunto. Finalmente se coloca una cubierta cerámica que se une fundiendo su envoltura vítrea.

El tipo plástico dual en línea consiste solamente en una moldura metálica con patillas, alrededor de la cual se dispone una envoltura plástica formándose así la unidad completa.

Todos ellos son normalmente horneados a altas temperaturas, tanto los componentes como los cubiertos antes de su unión, a fin de eliminar por completo los contaminantes que pueden quedar sobre las superficies.

Aunque, como hemos visto, los componentes quedan herméticamente encerrados, no quiere esto decir que el semiconductor está definitivamente protegido contra todo peligro del exterior ya que, por ejemplo, partículas de alta energía pueden atravesar de forma fácil la cubierta produciendo efectos perturbadores en el dispositivo.

#### 59.4.a COMPONENTES SIN ENCAPSULAR.

A diferencia de los tubos electrónicos, la mayor parte de los dispositivos semiconductores pueden funcionar eléctricamente aun sin ser encapsulados. El "chip" de semiconductor es completo en sí mismo, con terminales de conducción y una cierta protección superficial (el óxido). En esta forma sin encapsular, los chips son aptos para unión en circuitos integrados híbridos como se verá en otro lugar de esta asignatura.

#### 59.5 PROBLEMAS.

##### 59.5.1 ELEMENTOS PARASITOS.

Todas las conexiones vistas hasta aquí, crean ciertos elementos parásitos. Los dos más usuales son capacidades e inducciones, Fig. 59.10. Las primeras provienen

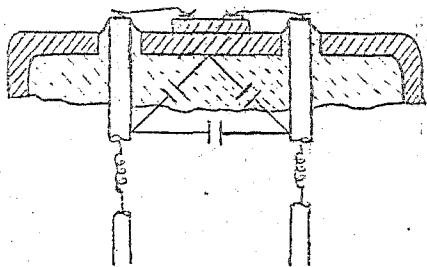


Fig. 59.10

, sobre todo, de las patillas debido a la proximidad a que se encuentran entre sí y que entre ellas existe un material de alta constante dieléctrica. También aparecen otras capacidades entre las patillas y el soporte del semiconductor que suele poseer un valor mucho más reducido.

Las inducciones provienen, también, de las patillas que han de tener una longitud suficiente como para ser fabricadas fácilmente y gruesas como para aguantar la corriente requerida. Ello lleva consigo un valor mínimo de inducción que no es fácil de rebajar. Por todo lo anterior, puede inferirse que la situación de las patillas es de importancia primordial y que habrá de estudiarse la configuración más adecuada, para cada caso. De un diseño no adecuado se obtendrá un com-

cilmente y gruesas como para aguantar la corriente requerida. Ello lleva consigo un valor mínimo de inducción que no es fácil de rebajar. Por todo lo anterior, puede inferirse que la situación de las patillas es de importancia primordial y que habrá de estudiarse la configuración más adecuada, para cada caso. De un diseño no adecuado se obtendrá un com-

portamiento malo para altas frecuencia no por causas del dispositivo sino de los elementos parásitos, autoinducciones y capacidades.

#### 59.5.2 CONSIDERACIONES TERMICAS.

Para elementos de alta potencia es realmente importante el que el conjunto disponga del medio adecuado para la transferencia de calor, bien a la atmósfera o bien a aletas de refrigeración. Esto hace que el diseño eléctrico tenga también estas miras, aparte de - otras vistas antes: el que exista una distribución homogénea de calor y que se disipe con facilidad. Una de las partes más estudiadas habrá de ser el soporte, esto es, el substrato cerámico que va a servir como aislante y que al mismo tiempo, ha de ser buen conductor del calor, esto es, ha de tener conductividad eléctrica, teóricamente, cero y conductividad térmica, teóricamente, infinita. El material que más se aproxima a esto es la cerámica alúmina.

Otro problema estriba en el coeficiente de dilatación - térmica que siendo el semiconductor, por ejemplo, silicio, habrá de - buscarse un soporte lo más parejo a él en este aspecto. Y esto no suele ser demasiado fácil, por lo que es usual colocar una fina oblea de un material que actúe de amortiguador, como puede ser el Kovar (aleación especial patentada por Westinghouse).

## 60. TECNICAS DE MEDIDA Y OBSERVACION DURANTE LOS PROCESOS DE FABRICACION.

Durante todo el proceso de fabricación de un circuito integrado es necesario tener un perfecto control de todos y cada uno de los factores que están interviniendo y, al mismo tiempo, y esto es tan importante como lo anterior, de si lo que está ocurriendo sobre la oblea, responde a los deseos previos, esto es, por ejemplo, si las difusiones se han desarrollado como se había previsto, si la capa de óxido se ha formado adecuadamente, si los contactos se han formado bien, si las tiras metálicas se extienden de forma continua por donde deben, si los hilos de unión del chip con los terminales de las patillas se han unido rígidamente. Esto por citar algunos de los muchos puntos que hay que controlar. Para todo ello se han desarrollado una serie de técnicas de medida y observación que permiten, en todo momento, conocer con bastante exactitud cómo se encuentra el proceso. Unicamente veremos aquí algunas de ellas.

### 60.1 METODO DE LAS CUATRO PUNTAS.

El objeto fundamental de este método de medida es la de conocer la resistividad superficial de una determinada capa semiconductor. Para ello, se disponen cuatro sondas metálicas equidistantes según puede verse en la figura, en contacto con la superficie de silicio. Una

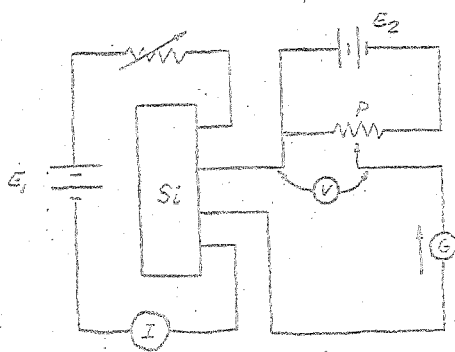


Fig. 60.1

corriente fija  $I$  se hace pasar a través de las dos sondas puntuales extremas, dando lugar a una diferencia de potencial  $V$  entre las dos puntas internas. Esta tensión ha de medirse con un detector de cora como el que se ve en la Fig. 60.1. Ello es debido a que el orden de magnitud de la resistencia que aparece entre las puntas interiores puede ser comparable, en orden de magnitud,

a la interna del voltímetro que se va a emplear en la medida. Si esto es así, la corriente medida  $I$  no sería la que en realidad pasase por el  $S_i$ , ya que una parte importante podría derivarse por el voltímetro. Esto daría lugar a medidas erróneas como ya es sabido. El método de compensar estas posibles derivas es con el esquema mostrado. Mediante el potenciómetro  $P$  se regulará la corriente que, suministrada por  $E_0$ , pasará por el galvanómetro  $G$ . Cuando esta corriente sea igual, y de signo contrario, a la que se derivó del semiconductor, el galvanómetro marcará cero, momento éste en el que la tensión medida será exactamente la que corresponde a la corriente  $I$ .

La corriente y el voltaje medidor pueden ser manipulados de forma que conduzcan al valor de la resistividad superficial. Ello lleva consigo el uso de factores de conexión que dependerán de las geometrías de sondas y muestra a medir.

Así, por ejemplo, para una hoja infinita, puede demostrarse que:

$$\rho_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} = 4,5324 \frac{V}{I}$$

mientras que para muestras finitas de formas circular o rectangular, la expresión pasa a ser

$$\rho_s = C \frac{V}{I}$$

donde  $C$  es una constante que dependerá del tamaño de la muestra y de la separación entre puntas.

A veces es conveniente, a fin de averiguar si existen contactos óhmicos, el de hacer una segunda medida de la resistividad con las polaridades de las tensiones invertidas. La resistividad habrá de ser la misma, pero si no es así, ello puede ser debido a probables rectificaciones del contacto.

Una posterior comprobación que debería hacerse sería la de hacer varias medidas a diferentes valores de corrientes. La resistividad debería ser la misma en todos los casos y si no ocurre así, deberán bajarse los valores de las intensidades hasta que dos medidas consecutivas, de valores decrecientes den el mismo resultado.

A fin de eliminar la influencia de estos potenciales de contacto en las medidas de la resistividad, se ha desarrollado otro método de medida en corriente alterna, que no se verá aquí por su mayor complejidad.

## 60.2 MEDIDA DE LA PROFUNDIDAD DE UNA UNIÓN.

La profundidad de una capa difundida se mide como la profundidad de la unión difundida formada por la introducción de una impureza en un sustrato de silicio que contenía impurezas de diferente tipo de conductividad. El contorno de la unión p-n así formada es mucho más fácil de determinar que el de otras uniones tipo n-n<sup>+</sup> o p-p<sup>+</sup> y de hecho, es de mucha mas importancia práctica.

A fin de medir esta profundidad se buscan métodos de teñir químicamente una región de un tipo de conductividad dejando intacta a la otra. Tales reacciones deben existir desde el momento en que el potencial electroquímico del silicio es diferente según sea tipo p o tipo n

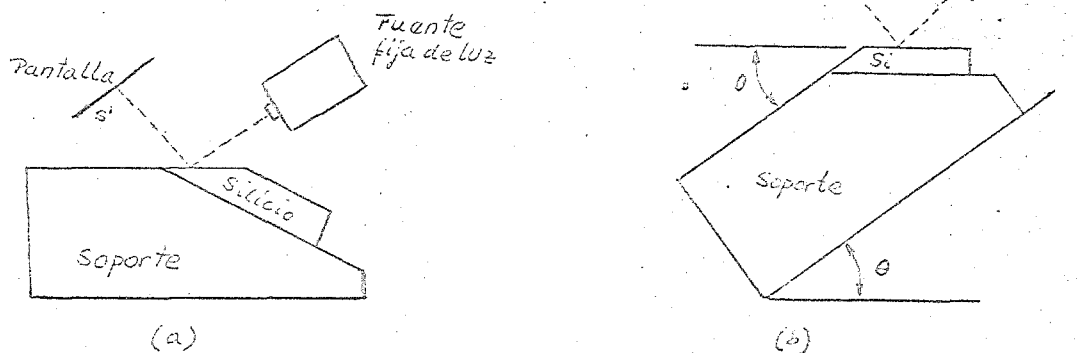


Fig. 60.3

#### 60.4 MEDIDA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE OXIDO.

Los métodos preferentemente usados se basan en técnicas ópticas debido preferentemente a su sencillez y exactitud. Otros métodos son el pesaje de las muestras, antes y después de la oxidación; pero se requiere un conocimiento de la densidad de la película a fin de pasar de peso a espesor. Medidas eléctricas, tales como tensión de ruptura, son útiles con fines comparativos, pero se requiere previamente conocer la rigidez dieléctrica si se desea calcular el espesor. Como puede verse, ninguno de ellos es o fácil o riguroso. De ahí el empleo preferente de métodos ópticos. Uno de ellos es el que describiremos aquí brevemente.

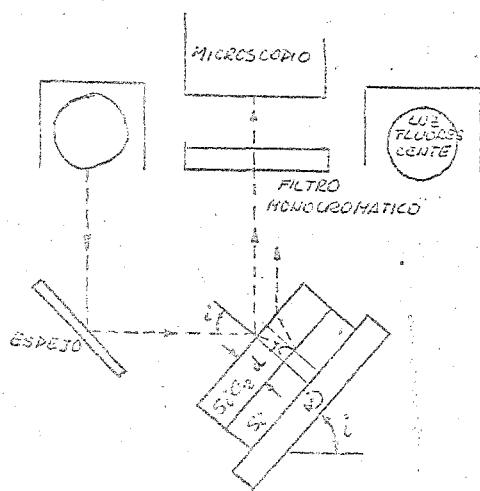


Fig. 60.4

La técnica VAMFO (Variable Angle Monochromatic Fringe Observation), esquematizada en la Fig. 60.4; es un método de medida no destructivo que emplea un microscopio con una plataforma giratoria sobre un eje normal al eje óptico del microscopio de forma que desde este se pueda observar la luz reflejada según varios ángulos. La figura que se observará por la interferencia de la luz reflejada por la superficie de óxido con la reflejada por la cara de separación silicio-óxido. La medida se basa en el recuento del número de máximos (o mínimos) de interferencia

observados en la rotación a través de un ángulo medido desde un ángulo inicial conocido de incidencia. Para un ángulo de incidencia  $i$ , la diferencia de caminos ópticos entre la luz reflejada por la superficie de óxido y la luz reflejada desde la interfase óxido-silicio viene dada por

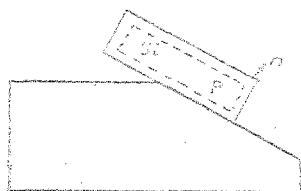
$$2 d n \cos r = N \lambda$$

(así como que tenga un tipo de concentración u otro), y con ello, la velocidad con que se realizarán las correspondientes reacciones químicas serán también diferentes. El requerimiento más rígido sería que actuara rápidamente sobre una muestra que lo hiciera muy despacio o incluso no comenzara, en el otro. El contorno entonces entre el silicio que ha reaccionado y el que no ha reaccionado identifica la localización de la unión p-n.

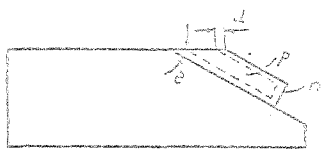
A fin de efectuar una medida lo más exacta posible de esta profundidad, y debido a su reducido valor, la primera etapa a realizar será la de pulir la sección de silicio un cierto ángulo (de 19 a 59). El resultado es el de incrementar la longitud expuesta

a la tintura en un factor de  $1/\sin \theta$  ( $\theta$  en radianes). Como puede verse en la Fig. 60.3 (b) la  $x_j$  buscada puede deducirse de la medida mediante

$$x_j = \theta d$$



(a)



(b)

Fig. 60.2

La forma de realizar el pulido puede verse directamente en la Fig. 60.2 donde se observa que la lámina de silicio se ha dispuesto sobre un soporte con el ángulo fijado previamente haciéndose la fijación mediante, por ejemplo, cera Apiezon. Una lámina de vidrio sobre la que se ha depositado polvo de alúmina (de 0,1 a 0,05 micras) puede servir

de agente pulidor. El tiempo requerido para realizar la operación variará con el tamaño de la muestra pero puede variar entre 30 y 60 segundos.

A continuación viene la etapa de teñido que puede variar de unos métodos a otros. Aquí describiremos el método original de Fuller y Ditzemberger que consiste en una mezcla de aproximadamente 0,1% de  $\text{NO}_3\text{H}$  concentrado en  $\text{FH}$  concentrado.

La acción de esta mezcla es oscurecer las regiones tipo p y dejar a las n prácticamente inalteradas. Las reacciones que ocurren no están perfectamente identificadas, pero el efecto que producen sí, y esto es lo que es realmente importante en nuestro caso. Hay varias otras tinturas que no detallamos aquí pero diremos que en muchas de ellas el proceso se acelera, por ejemplo, con luz intensa o con una tensión aplicada entre regiones. Los efectos de ambos factores suelen ser notorios.

La medida del ángulo  $\theta$  puede realizarse de varios modos pero todos ellos han de ser lo más exactos posible, ya que un pequeño error en su valor puede dar lugar a variaciones importantes en el  $x_j$  estimado. Una medida puede hacerse de la forma mostrada en la Fig. 60.3. El soporte con la muestra se fija sobre un cuadrante móvil y se incide un haz luminoso de un determinado tamaño sobre la parte pulida de la muestra y mantenida horizontal. La luz se reflejará e inducirá sobre una pantalla en la que se observará el tamaño del haz. Se girará a continuación, el soporte con la muestra hasta que la superficie del haz que se refleja sobre la pantalla sea la misma (Fig. 60.3 (b) que antes de la rotación. El ángulo será el  $\theta$  buscado.



siempre que ocurra una interferencia constructiva máxima, con  $\sin r = n$ .

$n$  = índice de refracción del  $\text{SiO}_2$   
 $d$  = espesor de la película de óxido  
 $N$  = entero que describe el orden de interferencia  
 $\lambda$  = longitud de onda de la luz monocromática.

A fin de obtener franjas de interferencia lo más nítidas posible se agrega delante del objetivo del microscopio un filtro monocromático aunque normalmente, de ser posible, será mejor emplear una lámpara de mercurio en lugar de una fluorescente.

Entre dos diferentes ángulos de incidencia  $i_1$  e  $i_2$  para los que resulta una interferencia constructiva máxima, de la expresión anterior se obtiene

$$N_1 \lambda = 2nd \cos r_1$$

$$N_2 \lambda = 2nd \cos r_2$$

y así

$$d = \frac{(N_2 - N_1) \lambda}{2n(\cos r_2 - \cos r_1)}$$

Como puede verse lo único que es necesario conocer durante la medida, es el ángulo inicial de incidencia, el ángulo final de incidencia y el número de máximos o mínimos en la rotación desde la posición inicial a la final. Solo con eso, y suponiéndose conocidos  $\lambda$  y  $n$ , podrá calcularse  $d$ . Como puede verse, la principal ventaja de este método es que es completamente no destructivo. Sus desventajas son que pierde cierta exactitud en la medida y que ha de conocerse  $n$ , esto es, el índice de refracción.

## 60.5 MICROSCOPIO.

Aparte de las medidas anteriores, que se refieren sobre todo a características de los procesos efectuados sobre una oblea (difusión y oxidación) es conveniente, muy a menudo, realizar otro tipo de observaciones. Se refieren estas al estado superficial de un circuito integrado, esto es, al estudio de las conexiones y de las metalizaciones por ejemplo. La forma de realizar estas observaciones es, como puede suponerse, mediante microscopio. Veremos aquí dos de los más comúnmente empleados, el metalográfico y el electrónico, aunque otros, por ejemplo, el de muestreo, están ganando terreno rápidamente.

### 60.5.1 MICROSCOPIO METALOGRAFICO.

Aunque el fundamento lo suponemos conocido de la Física elemental, daremos a grandes rasgos una idea de sus partes esenciales (Fig. 60.5). Una lente convergente (objetivo) produce una imagen real del objeto a una distancia determinada de su plano focal imagen, la cual actúa como objeto de una segunda lente, también convergente (ocular) que forma la imagen final, ampliada, para observar directamente o ser recogida en una placa fotográfica. La distancia entre el plano focal imagen de la primera lente y la imagen formada por esta se llama longitud óptica del tubo.

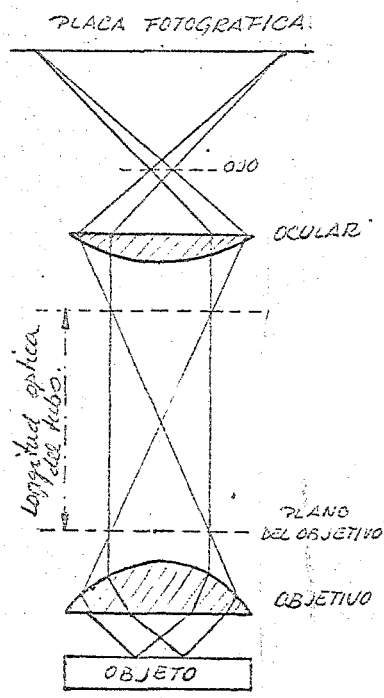


Fig. 60.5

Se denomina aumento del microscopio a la relación entre el tamaño de la imagen y el del objeto; según se demuestra en Física viene dado por la expresión

$$A = \frac{\Delta}{F_1 \cdot F_2}$$

en donde  $\Delta$  es el intervalo óptico (distancia entre el foco del objetivo y del ocular),  $l$  la mínima distancia de visión distinta (mínima distancia a que un ojo normal puede ver perfectamente sin acomodación  $\sim 25$  cm),  $F_1$  y  $F_2$  las distancias focales del objetivo y del ocular. A la relación  $\Delta / F_1$  se denomina aumento lateral del objetivo y a  $\Delta / F_2$  aumento visual del ocular.

Una de las características fundamentales de los objetivos es su poder separador que viene definido como el inverso de la mínima distancia a que deben estar situados dos puntos del objeto para ser vistos distintamente. Viene dada por la expresión

$$d = \frac{\lambda}{n \sin \alpha}$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz utilizada,  $n$  el índice de refracción del medio y  $\alpha$  el ángulo de semiapertura de la lente, es decir, la mitad del ángulo que forman los rayos que partiendo del punto del objeto, bordean el objetivo y penetran en el ocular.

Vistas muy someramente las características de un microscopio ordinario, pasemos a ver las modificaciones que han de hacerse a fin de poder denominarle metalográfico. Esencialmente son los que se refieren a la iluminación del objeto y ello es debido a los dos siguientes puntos: a) para grandes aumentos no es suficiente con la luz difusa, sino que se requiere una concentración de foco sobre la muestra, que no presente reflejos perturbadores ni llegue a calentar la estructura de estudio y b) la muestra deberá recibir la luz del mismo lado que se observa, esto es, por reflexión.

La primera condición se satisface con el principio de iluminación de Köhler cuya representación esquemática es la de la Fig. 60.6.

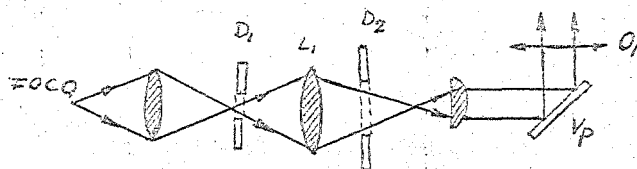


Fig. 60.6

Un foco proporciona, a través de una lente colectora, un haz luminoso que se limita por el diafragma  $D_1$ , variable a voluntad. Muy próxima a la apertura de este existe una primera lente auxiliar  $L_1$  y un segundo diafragma  $D_2$  que permite modificar, entre ciertos límites, la magnitud de la parte de la muestra que se desea analizar más minuciosamente.

La imagen del foco luminoso y diafragma, formada por la lente colectora y las auxiliares penetra, después de reflejada por el espejo Vp, por la abertura del objetivo O, el cual, corregido para el infinito, proyecta sobre la superficie del objeto el campo diafragmado.

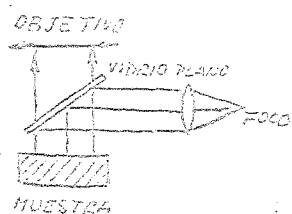


FIG. 60.7

La iluminación de la muestra se hace normalmente de la forma denominada normal o de campo claro (Fig. 60.7). En ella los rayos inciden perpendicularmente a la superficie reflectora, apareciendo ésta brillante.

## 60.5.2 MICROSCOPIO ELECTRONICO.

La calidad de una imagen óptica está determinada por el poder separador del instrumento. Los fenómenos de interferencia y difracción suponen para distancias de  $1-2 \times 10^{-3}$  mm. una barrera para el microscopio. Por ello, basándose en las ideas de la onda asociada a todo movimiento de partículas se desarrolló el microscopio electrónico.

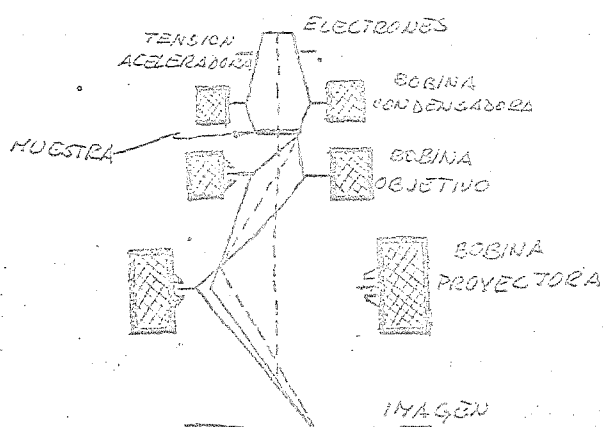


FIG. 60.8.

Su constitución es análoga a la de un microscopio ordinario: foco energético, condensador, muestra en el portaobjetos, objetivo, ocular y plano de proyección (Fig. 60.8). La óptica electrónica está sometida a las leyes de la óptica geométrica y a las de la naturaleza ondulatoria de la luz. Los haces electrónicos son refractados también en lentes cuyos medios son campos magnéticos. Por todo ello, sus trayectorias podrán gobernarse de acuerdo con las leyes ya conocidas de la balística electrónica que no veremos aquí. Los campos magnéticos presentes, curvarán las trayectorias de acuerdo con su intensidad, con lo que podrá lograrse

que un determinado electrón, proveniente de un cierto punto de la muestra, aparezca en una posición u otra, esto es, pueda lograrse un cierto aumento.

Con lo anterior, ya puede comprenderse la construcción de una lente electrónica y su funcionamiento. El haz de electrones, después de atravesar el objeto o ser reflejado por su superficie, es difundido en todas direcciones, de forma distinta por cada parte del objeto. Este modifica, pues, el haz como en la óptica ordinaria. Al penetrar en la lente se le obliga, modificando el campo magnético, a describir una trayectoria espiral, pero de modo que los rayos que parten del foco de la lente coincidan de nuevo en un punto. La convergencia de las lentes dependen de la distribución de los campos a lo largo del eje óptico y de la tensión aceleradora. Es fácil comprender por qué el microscopio electrónico puede alcanzar un poder mucho mayor que el ordinario. Son valores normales los de  $1,6 \times 10^5$  aumentos con un poder separador de  $1-1,5 \times 10^{-6}$  mm., es decir,  $15 \text{ \AA}$ .

La imagen se recoge en una placa fotográfica o se observa en una pantalla tipo de osciloscopio por ejemplo. Cuando se desea observar la superficie de un objeto, como es nuestro caso, al que no atraviesa la luz hay que utilizar la microscopía superficial. No nos detendremos más aquí en este tipo de microscopio ya que nos saldríamos de los límites que aquí caben. Solo queda señalar que su inclusión en el estudio y reconocimiento de los circuitos integrados y de las partes que los componen, junto con el microscopio de muestreo, ha dado lugar al control de una gran cantidad de defectos y posibles causas de fallo que, de otra forma, no habrían sido encontrados.

## 61.1 IDEAS GENERALES SOBRE DISEÑOS DE CIRCUITOS INTEGRADOS: PROBLEMAS.

La primera consideración a tener en cuenta en el diseño de un monolítico es determinar el número de regiones aisladas requeridas. Según vimos, una región aislada o casilla, es una región tipo  $n$  correspondiente al colector de un transistor. Esta región se encuentra aislada de otras similares mediante diodos polarizados inversamente. La razón de encontrarse aisladas eléctricamente es la de poder mantener diferentes niveles de polarización en cada región tipo  $n$ . Por ello, el número de casillas vendrá dado, primero, por el número de colectores que han de tomar potenciales diferentes. El tamaño de dichas casillas deberá mantenerse tan pequeño como sea posible a fin de reducir las capacidades parásitas que aparecen entre el colector y el sustrato.

La forma más fácil de ver cómo se lleva a la práctica esto puede ser con un ejemplo. La Fig. 61.1 muestra una puesta lógica de

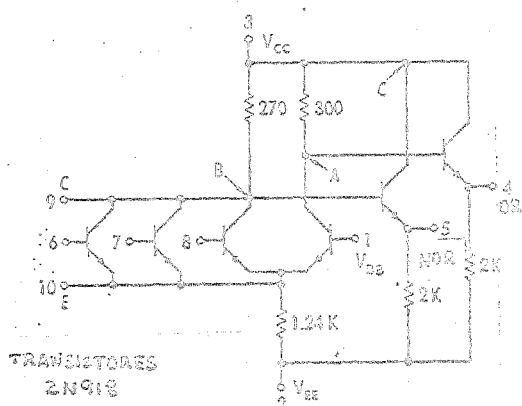


FIG. 61.1

contrarse aislados eléctricamente a fin de evitar el que las dos salidas sean la misma. Por ello, habrán de disponer de regiones aisladas M y N, para los tres transistores de entrada y para el transistor 1 de polarización fija.

Ya que las salidas parten de los dos nudos A y B, las medidas de respuesta transistoraria pueden tomarse en las dos salidas o en una sola. La capacidad parásita total que aparezcan en A o B afectará a las respuesta transistoraria y a su correspondiente salida. A fin de igualar los dos valores transistorarios medidos en las dos salidas, las capacidades parásitas habrán de ser iguales. Esto se logra reduciendo el área de la región N a un mínimo y haciendo el área de la región M igual a la de la N, ya que según vimos, la capacidad será proporcional al área.

Las regiones de colector de los transistores seguidores de emisor se mantienen a  $V_{cc}$ , el potencial más positivo que aparece en el circuito. Ya que  $V_{cc}$  es diferente de los potenciales que aparecen en A y B será necesaria una tercera región de aislamiento, E, para estos transistores.

tres entradas. De ella - puede obtenerse que, primero, hay tres transistores de entrada con colector común. Su nivel de tensión viene fijado por su conexión a través del seguidor de emisor, a la salida, en el terminal 5. El transistor, cuya entrada aparece en el terminal 1, tiene también su colector conectado a otro seguidor de emisor que va a una salida complementaria en el terminal 4. Puede verse que el punto B común a todos los colectores, y el punto A deben en

Los resistores, como se vió en su momento, se forman normalmente, en la misma operación de difusión que forma la base de los transistores. Según vimos también, aparecía un --- transistor p-n-p parásito, entre el resistor (emisor), la región n de aislamiento (base) y el sustrato (colector). Por ello, la tensión más negativa presente en el circuito deberá conectarse al sustrato a fin de evitar efectos parásitos. Esta condición de voltaje presenta el transistor parásito pn-p en los resistores, con una región de colector polarizada inversamente. Se ve también que la unión del resistor difundido deberá mantenerse polarizado inversamente con el doble fin de mantener la integridad del resistor y el transistor parásito sin conducir. Todo esto se puede conseguir conectando la región de aislamiento tipo n que rodea al resistor, conectada al potencial más positivo presente en el circuito. Esto asegurará el que las dos uniones se encuentran polarizadas de forma inversa bajo todas las condiciones del circuito. A fin de asegurar que esto ocurre para todos los resistores, todos se suelen colocar, si es posible, en la misma región de aislamiento (casilla). Los resistores, además, se encontrarán aislados unos de otros por las series p-n y n-p (  $\star$  y  $\star$  ) colocados en oposición

Los resistores y los transistores de seguidor de emisor pueden colocarse en la misma casilla P, debido a que el nivel del voltaje requerido en los colectores es el mismo que para la región de aislamiento n que debe rodear a los resistores. Este es el único caso en el que ambos componentes aparecen en la misma casilla. Por ello, en caso de duda, será preferible ponerlos en casillas independientes.

Aunque en el ejemplo presentado no aparecen diodos o condensadores, será conveniente dar aquí algunas pequeñas indicaciones para el caso en que estén presentes.

De acuerdo con lo visto anteriormente, existen varias configuraciones posibles para diodos. De todas ellas, según la tabla dada, se tomará aquella que mejor responda a los requisitos eléctricos del circuito. De forma general diremos aquí que la utilidad de la configuración del diodo colector-base es bastante reducida, debido a que no puede polarizarse directamente por la acción de shunt asociada con el transistor parásito p-n-p. Sin embargo, el diodo emisor-base no tiene tal limitación si se conecta adecuadamente. Así, a fin de poder usar el diodo emisor-base en condiciones de polarización directa, la base que constituye el ánodo del diodo debe ser puesta en corto con el colector o con la región de aislamiento en que está localizada. Esta condición fija el potencial del colector con respecto a la base, eliminando cualquier acción p-n-p o n-p-n expuesta debida a los potenciales inducidos en el colector.

Con respecto a los condensadores, ya que la unión emisor-base tiene el valor de capacidad por unidad de área mayor que cualquier otra de las posibles uniones de una oblea, siempre se tomará esta para formar los condensadores de unión. El valor de la capacidad puede aumentarse cortocircuitando externamente el emisor con el colector. Con ello aparecen en paralelo dos capacidades, la emisor-base y la colector-base. En este tipo de condensador, la base ha de conectarse siempre a un potencial más negativo que las regiones colector-emisor, a fin de eliminar posibles conducciones.

#### TAMAÑO DEL CHIP.

El mínimo tamaño del chip en un circuito monolítico viene determinado por

1. El área de las regiones de aislamiento.
2. El área mínima requerida para los terminales de unión en los bordes del chip.
3. El área requerida para llevar las conexiones metálicas sobre el óxido de silicio para interconectar los componentes.

El área de las regiones de aislamiento viene determinada por las dimensiones físicas de los componentes contenidos en las mismas y estas, a su vez, por los requerimientos del circuito.

A fin de facilitar la unión de los hilos de conexión entre las patillas y el chip, se disponen terminales de unión en los bordes de ésta, el tamaño de los cuales del orden de  $0,073 \times 0,125$  mm.

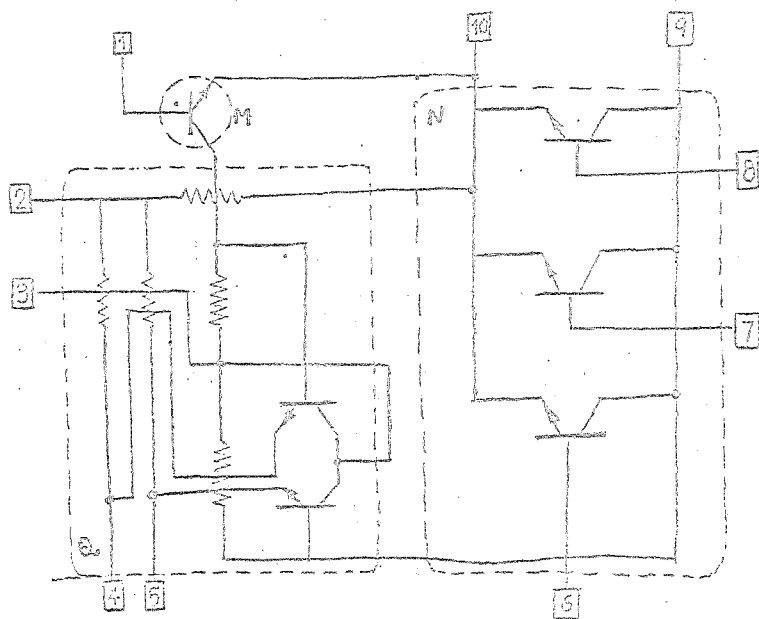
El área cubierta por las tiras metálicas de interconexión que van entre compuestos y entre estos y los terminales deberá también minimizarse. Su anchura debe ser igual o menor que  $0,025$  mm.

Un tamaño normal de chip puede ser del orden de  $0,125 \times 0,125$  mm. Se requiere que dicho tamaño sea lo menor posible por dos razones:

1. El número de circuitos producidos por oblea incrementa según disminuye el tamaño del chip.
2. Según estadísticas, la probabilidad de defectos en un chip de semiconductor, incrementa según aumenta el área.

### CONEXIONES Y CRUCES.

El problema de interconectar los componentes en un circuito monolítico puede resolverse como se ve en la Fig. 61.2, donde se ha



dibujado de nuevo el circuito de la Fig. 61.1 a fin de disponerla en la forma adecuada para su integración, con indicación de las casillas a formar. Cualquiera que se ve, puede servir como soporte para un cruce. Si el circuito fuese tan complejo que fuera, forzosamente, necesario hacer un cruce entre conexiones podría agregarse un conductor difundido al dibujo. No entraremos en este tipo especial de cruce, pero indicaremos que para su formación habrá de tenerse en cuenta el nivel de voltaje

de cada tira de metal y la posibilidad de capacidad parásita entre ellas. No es muy recomendable su inclusión y deberá evitarse siempre que sea posible.

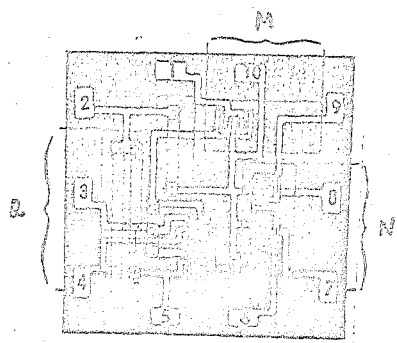


FIG. 61.3

Con todo ello, el circuito quedará como puede verse en la Fig. 61.3

## 61.2 TECNOLOGIA MOS.

Veremos aquí muy brevemente una comparación del modo de fabricar circuitos integrados de MOS, comparado con el ya visto de transistores bipolares. Nos detendremos especialmente en el convencional MOS de canal P ya que es el mas comúnmente producido.

### PROCESO DE MOS DE CANAL P TÍPICO.

Como ya hemos dicho, en la producción de circuitos integrados a gran escala, el MOS de canal P ha llegado a ser el standard industrial. Su preponderancia sobre N se basa en la facilidad con que las propiedades superficiales del óxido de silicio pueden controlarse en el proceso del canal P. Ello a pesar de que teóricamente, el N ofrece un comportamiento eléctrico, como puede verse de la física de este tipo de dispositivos.

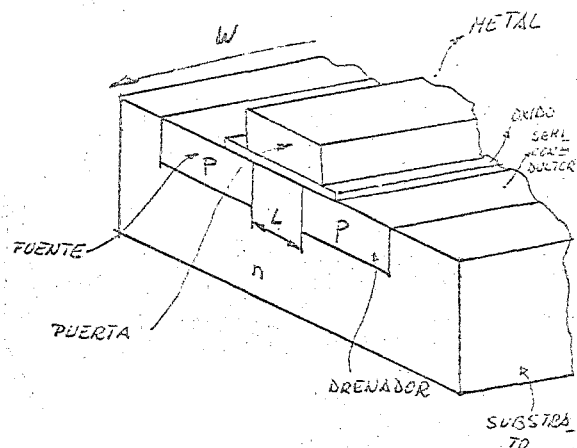
Las etapas de realización de un dispositivo MOS podemos integrarlos en la siguiente serie.

#### A. FABRICACION DE LA OBLEA.

1. Material de partida: silicio <111>
2. Oxidación inicial.
3. Máscara primera (para región P).
4. Predeposición de Boro.
5. Difusión-oxidación.
6. Máscara segunda (puerta)
7. Oxidación de la puerta.
8. Máscara tercera (contacto)
9. Metalización.
10. Máscara cuarta (metal)
11. Deposición de la positivización
12. Máscara quinta (terminales)

#### B. MONTAJE.

1. Evaluación de la oblea.
2. Elección del chip.
3. Rayado y separación de los chips.
4. Inspección óptica.
5. Operación de unión del chip.
6. Operación de soldadura de los terminales
7. Inspección óptica.
8. Sellado.
9. Pruebas de hermeticidad.
10. Pruebas ambientales.
11. Pruebas eléctricas finales.



Como vemos, en poco difieren de las convencionales de un bipolar. Únicamente, como es lógico, debido a la diferente estructura de ambos, el orden de las operaciones es diferente y el número de difusiones también. Pero la tecnología puede considerarse análoga. Únicamente señalaremos que uno de los factores más importantes a favor de los MOS es su economía debido a la simplicidad de su proceso. Como hemos visto, los circuitos integrados requieren menor número de etapas en su proceso que los transistores bipolares y esto repercute en su costo.

Enumerando simplemente las etapas principales necesarias para producir un circuito integrado de cada tipo, puede encontrarse que los números son del orden de 32 para el caso bipolar y 22 para el MOS. Ejemplos de etapas principales son crecimiento epitaxial, deposición de la base, difusión de base, eliminación del fotoresist, evaporación, etc. Esto sugiere que el bipolar es como un 45 por ciento más difícil que el MOS, en cuanto a proceso se refiere.



## 62.1. CONSIDERACIONES PRACTICAS SOBRE EL DISEÑO DE C.I.'S.

Aunque ya en apartados anteriores se han mencionado todos, o casi todos, los detalles más importantes a tener en cuenta a la hora de bosquejar el diseño de un C.I., daremos aquí el resumen de todo en una serie de reglas que lo sumarán.

1. Determinar el número de casillas.
2. Dibujar el esquema eliminando los cruces siempre que sea posible.
3. Minimizar el área de las casilla sobre los que influencia de capacidades parásitas pueden ser importantes.
4. Determinar la geometría de los componentes de acuerdo con los requisitos del circuito.
5. Conectar la región de aislamiento de los resistores a la tensión más positiva del circuito. Los resistores pueden aparecer en la misma casilla.
6. Conectar el sustrato al voltaje más negativo del circuito.
7. Mantener el mínimo tamaño de chip compatible con (a) número de casillas, (b) área de las casilla (c) área requerida para los terminales y (d) área requerida para las conexiones entre componentes.

Una vez realizado todo lo anterior queda llevar a cabo los procesos necesarios para la verdadera fabricación del circuito. Igual que hemos dicho antes, los detalles ya han sido vistos anteriormente y solo queda ponerlos en orden. Como el proceso total es bastante largo no lo indicaremos aquí sino que puede verse en el Apéndice.

Su lectura detenida da idea de la complejidad envuelta en la tecnología de C.I.'S y los pequeños detalles que lleva consigo. Eso hace el que cualquier pequeño fallo o variación hace el que todo el proceso falle. Por el contrario, una vez logrado un total dominio de las etapas, la tecnología de C.I.'S queda reducida a una mera serie de recetas que, de cumplirse con toda exactitud, hace su fabricación, cuestión de rutina.

## 62.2 LIMITACIONES. VALORES DE LOS COMPONENTES.

La forma más directa de ver las limitaciones presentes en los componentes de C.I.'S es presentar un pequeño sumario de los valores de sus parámetros más importantes.

Características del transistor.	Colector no dopado con oro 0,5 ohm-cm	Colector dopado con oro 0,1 ohm-cm.
BVCBO .....	55 volts	25 volts
BVEBO .....	7 volts	5 volts
BVCEO .....	23 volts	14 volts
BVCS .....	75 volts	25 volts
CTE (polariz inversa)	6 pf	10 pf
CTE a 0,5 volts .....	1,5 pf	2,5 pf
CTC a 5 volts .....	0,7 pf	1,5 pf
CTS a 5 volts .....	2,9 pf	4,6 pf
$\beta$ a 10 mA .....	50	50
$\beta$ a 0,1 mA .....	30	10
$V_{SC}$ .....	75 ohms	15 ohms
$V_{CE(SAT)}$ a 5 mA .....	0,5 volts	0,26 volt
$V_{BE}$ a 10 mA .....	0,85 volt	0,85 volt
$f_T$ a 5 volts, 5 mA .....	440 Mc	520 Mc
$f_{max}$ .....	1,1 gc	
$\tau_{ES}$ .....		10 nseg

Así, en la tabla 62.I vemos las características de transistores monolíticos de 0,025 x 0,0375 mm. Entre las diferencias más significativas se puede señalar el valor de la frecuencia  $F_T$ ; el transistor equivale al de colector sin dopar con oro es el 2N918 que posee una  $F_T$  del orden de 900 Mc, o sea casi el doble, ello es debido a que el 2N918 posee menores capacidades y resistencias parásitas. Por ello, una de las primeras limitaciones que pueden señalarse es la respuesta en frecuencia aunque esto no es sino relativo ya que, realmente, lo único que hemos hecho comparando un transistor discreto, en condiciones análogas, posee una frecuencia de corte superior, pero esto no quiere decir que veamos limitadas nuestras aplicaciones por la frecuencia ya que solo se ría cuestión de estudiar otra estructura mas conveniente y la limitación quedará superada.

#### VALORES TÍPICOS PARA DIODOS

CARACTERISTICAS	(a) $V_{CB}=0$	(b) $V_{CE}=0$	(c) $V_{EB}=0$	(d) $I_C=0$	(e) $I_E=0$
Voltaje ruptura volts.	7	7	55	7	55
Tiempo almacenamiento.hsec	9	100	53	56	85
Tensión inversa volts.	0,85	0,92	0,94	0,96	0,95
p-n-p .....	0	3	2	3	3
Cp,pf (5 volts polarización inversa) .....	0,5	1,2	0,7	0,5	0,7
Cp,pf (substrato a 5 volts negativos respecto al colector) .....	2,9	2,9	2,9	1,2	2,9

Con respecto a los diodos, en la tabla 62.II puede verse un pequeño sumario comparativo de las varias conexiones posibles de diodo. Como puede observarse cada configuración presenta un tipo de ventajas con respecto a los otros que pueden apreciarse rápidamente estudiando dicha tabla. No nos detendremos en ello que queda como ejercicio.

Pasando ahora a componentes pasivos; los dos únicos vistos han sido resistores y condensadores. Con respecto a estos últimos ya se ha presentado un tabla, la 62.II, indicativa de sus características medias. Creemos que no es necesario agregar nada a lo allí expuesto.

Con respecto a los resistores, una idea bastante exacta de los valores típicos puede extraerse de la tabla 62.II y de la Fig. 62.5.

#### VALORES DE RESISTORES

CARACTERISTICAS	HIBRIDO	MONOLITICO
Resistencia ohm/cuadro .....	2.5-300	2.5 or 100-300
Máximo valor .....	ver Fig. 10-18	ver Fig. 10-18
Coefficiente temperatura ppm/OC.	500-2,000	500-2,000
Disipación máxima watt .....	0,25	0,1
Tolerancia, % .....	± 5	± 10

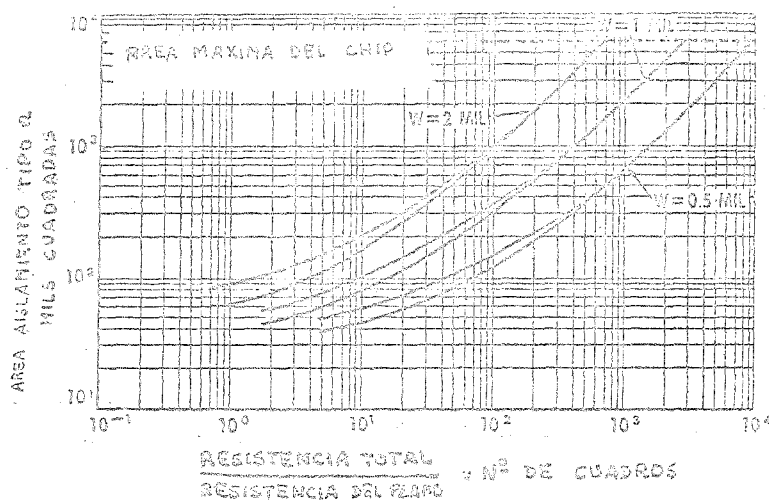


Fig. 62.5

En esta última aparece un dato muy importante y es el del área necesaria de aislamiento para cada tipo de resistor difundido, dada en función del valor del mismo y de un tamaño (o mejor del parámetro  $W$ , *nachura*). De ella puede obtenerse un orden de magnitud del valor máximo que puede obtenerse, por el momento, para resistores difundidos.

### 62.3 IDEAS SOBRE INTEGRACION A GRAN ESCALA

Aunque los circuitos integrados de gran escala (LSI en la nomenclatura de lengua inglesa por "Large Scale Integration") están todavía en su infancia, pueden conseguirse ya, siguiendo métodos desarrollados anteriormente para otras técnicas de estado sólido, circuitos suficientemente sofisticados y de calidad. Con ellos, los costos y el rendimiento pueden ser, respectivamente, disminuidos y elevado. Cabe entonces preguntarse qué se entiende por integración a gran escala. Y las definiciones dadas son varias. Una, muy sintetizadora de todas, es la que dice que un circuito integrado a gran escala es un chip de silicio sobre el que han sido depositados un gran número de componentes activos y pasivos de forma que puedan realizar una multitud de funciones circuitales. Otras definiciones están relacionadas con el número de "puertas", el tamaño del chip y número de componentes por centímetro cuadrado. Quizás esta de dar número de componentes por  $\text{cm}^2$  es la más engañosa pues puede encontrarse un chip con un número muy elevado de componentes, que la mayor parte sean resistencias y otro, con mucho menor número, pero que sean transistores. El segundo en este caso, bajo ciertas características puede considerarse más integrado a gran escala que el primero.

Quizás la definición que da más idea del orden de magnitudes que se manejan es la que la define como la interconexión de 100 o más circuitos de complejidad similar a la de una puerta lógica, en un único chip de semiconductor. Y ya que una puerta simple tiene varios transistores, esto implica que tendremos interconectados varios miles de transistores en un volumen de silicio del orden de  $1,7 \text{ mm}^3$ . Como ejemplo podemos señalar que se ha fabricado hasta hoy, conjuntos conteniendo más de  $10^4$  transistores y es seguro que esta cifra queda pequeña muy pronto, pasándose al orden de los millones.

Como puede comprenderse de lo anterior, los problemas que se presentan son de índole muy diferente a los tenidos para pequeña escala, los problemas de diseño, chequeo y evaluación son formidables. La fiabilidad de los mismos obliga que se introduzcan técnicas

de auto-diagnostico como parte del mismo sistema. Cualquier avería, es fácil pensar, lleva a la eliminación de todo el conjunto. Por ello lo mas común es asociar varios bloques para formar un sistema. Con ello, avería de una parte solo conduce a la eliminación de un panel. Por ello no es difícil encontrar, por ejemplo, conjuntos de 10 módulos interconectados por técnicas análogas a las de circuitos impresos multicapa - en paneles de los que, como ejemplo, puede haber 50 en un sistema. Así, cada módulo, con unas dimensiones de 5x2,5x0,6 cm puede contener 2.800 transistores y cada panel, midiendo 23x15x0,6 cm, contienen del orden de 28.000 transistores.

Se ve fácilmente que los problemas de disipación térmica, a estos niveles, son colosales.

T A B L A 62.IV

<u>NIVEL DE COMPONENTE</u>	<u>DISIPACION DE POTENCIA (WATS)</u>	<u>DENSIDAD DE POTENCIA (W/cm<sup>2</sup>)</u>
Transistor	0,0005	15,5
Puerta	0,0015	7,8
Chip	0,170	3,1
Módulo	1,36	0,15
Panel	13,6	0,015

La tabla 62.IV resume la potencia y la densidad de potencia disipada en cada nivel de componente para un caso típico de un sistema. Aunque la potencia disipada a cada transistor es muy pequeña, su densidad de potencia es muy grande. Por ejemplo, la de un chip es la - aproximada de una lámpara de 500 Watios. Por ello, la interfase entre el chip y el módulo deberá ser diseñada cuidadosamente a fin de asegurar una buena conducción térmica fuera del chip a fin de que este no - se caliente excesivamente.

Todo lo anterior sirve de ejemplo, aunque muy breve, a la serie de nuevos problemas que se presentan frente a este tipo de integración de circuitos. Existe además un punto muy importante y es que es muy posible que, llegados a su solución, el desarrollo tecnológico en ese intervalo de tiempo haya dejado esos problemas atrás y aparezcan otros nuevos. De hecho, no puede predecirse a donde se llegará en el - paso de muy pocos años.

## PROCESO DE FABRICACION DE UN CIRCUITO INTEGRADO.

Saber integrar, merece, obviamente, no solo que fijemos nuestra atención a las bases teóricas y tecnológicas de los procesos, sino a su desarrollo y concatenación.

A continuación se describen unas etapas típicas para fabricar un determinado circuito integrado en un laboratorio. El proceso básicamente siempre es el mismo, aunque puede diferir en detalles, sobre todo en la fabricación industrial.

Al leer con atención el desarrollo del proceso se pueden sacar conclusiones muy provechosas sobre la rigurosa limpieza, control e inspección a que deben ser sometidos todas las etapas del proceso.

## PROCESO DE FABRICACION DE UN CIRCUITO INTEGRADO BIPOLAR.

### 1. LIMPIEZA DE LA OBLEA.

- 1.1. La oblea se inspecciona cuidadosamente al microscopio, para rechazar la que tuviera imperfecciones.
- 1.2. Se lava en tricloroetileno con ultrasonidos, durante tres minutos.
- 1.3. Se lava la oblea con spray de metanol.
- 1.4. Se seca la oblea con nitrógeno seco y caliente.
- 1.5. Se inspecciona la oblea.
- 1.6. Se limpia la oblea en una solución de 40%  $\text{SO}_4 \text{H}_2$  y 60%  $\text{H}_2 \text{O}_2$ .
- 1.7. Se lava en agua desionizada durante 5 minutos.

### 2. OXIDACION (1050°C)

- 2.1. Se ataca la oblea durante un minuto en una solución de una parte FH en 6 de agua desionizada, y luego se guarda en un recipiente de agua desionizada.
- 2.2. Se lava la oblea en agua corriente durante 5 minutos.
- 2.3. Se seca la oblea en nitrógeno caliente.
- 2.4. Se introduce la oblea en la cápsula que se deja 5 minutos a la entrada del tubo de difusión.
- 2.5. Se oxida en oxígeno seco durante 15 minutos.
- 2.6. Se oxida en atmósfera húmeda durante 45 minutos.
- 2.7. Se sigue con 5 minutos de oxidación seca.
- 2.8. Se deja enfriar la cápsula portaoblas 2 minutos en el extremo del tubo de difusión.

### 3. FOTORRESINA.

- 3.1. Poner la oblea durante 10 minutos a  $170^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- 3.2. Centrifugar la oblea con dos gotas de fotorresina, durante 15 segundos a 4000 r.p.m. subiendo la velocidad durante los tres primeros segundos.
- 3.3. Poner la oblea durante 10 minutos a  $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  (En una plancha caliente con termostato).
- 3.4. Alinear la máscara primera respecto al corte de la oblea. Se realiza en un microscopio y micromanipuladores, automáticamente se retira el objetivo y se ilumina durante 6 segundos con luz ultravioleta. La oblea se sujeta por aspiración de vacío en unos orificios de la base en que se   
*apoya*
- 3.5. Se disuelve la fotorresina no polimerizada con un spray del disolvente adecuado.
- 3.6. Se lava la oblea con un disolvente durante unos segundos.
- 3.7. Se seca la oblea con nitrógeno caliente.
- 3.8. Se inspecciona la oblea al microscopio para asegurar su limpieza y la de finición fotográfica.
- 3.9. Se calienta la oblea durante 20 minutos  $170^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- 3.10 Se ataca el óxido con una disolución de 4 partes en volumen de  $\text{NH}_4\text{F}$  y una parte de  $\text{FH}$  durante 5 minutos y al final se echa en agua desionizada.
- 3.11 Se lava la oblea en agua corriente desionizada durante un minuto.
- 3.12 Se seca la oblea en nitrógeno líquido.
- 3.13 Se inspecciona la oblea. Si el óxido no está atacado se vuelve a repetir desde 3.10.
- 3.14 Se disuelve la fotorresina protectora con una disolución de 9 partes - en volumen de  $\text{SO}_4\text{H}_2$  y una parte de  $\text{NO}_3\text{H}$ , a  $90 \pm 10^{\circ}\text{C}$  durante 10 minutos.
- 3.15 Se repite 3.14 y se sumerge la oblea en agua desionizada.
- 3.16 Se lava la oblea en agua corriente desionizada durante 5 minutos.
- 3.17 Se almacena la oblea en un recipiente limpio de cuarzo que se mantiene en atmósfera seca  $30^{\circ}\text{C}$ .

### 4. DIFUSION DE LA CAPA DE AISLAMIENTO DE BORO ( $1140^{\circ}\text{C}$ ).

- 4.1. Limpiar la oblea en una solución de un 40% de  $\text{SO}_4\text{H}_2$  y un 60% de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Sumergirla en agua desionizada, para acabar la reacción.
- 4.2. Lavar la oblea en agua corriente desionizada.
- 4.3. Atacar la oblea en una disolución de una parte de  $\text{FH}$  en seis de agua desionizada, durante 15 segundos. Sumergirla después en agua desionizada.

- 4.4. Lavar la oblea en agua desionizada durante 5 minutos.
- 4.5. Soplar la oblea, para secarla, en nitrógeno seco y caliente.
- 4.6. Colocar la oblea en el extremo de un horno, sobre un bote de cuarzo, durante 5 minutos, con presión de 25 cm de agua. El nitrógeno limpia el horno de deposición del boro.
- 4.7. Se precalienta el bote y la oblea durante 5 minutos en el horno a  $1140^{\circ}\text{C}$  con corriente de  $\text{N}_2$  a  $1140^{\circ}\text{C}$ .
- 4.8. Depósito de boro durante 5 minutos, en corriente de  $\text{N}_2$ .
- 4.9. Limpieza del bote y la oblea con  $\text{N}_2$  a  $1140^{\circ}\text{C}$  durante 10 minutos.

#### 5. REDISTRIBUCION DE LAS IMPUREZAS ( $1160^{\circ}\text{C}$ .)

- 5.1. Atacar la oblea durante 2 minutos en mezcla de  $\text{CH}_2\text{O} + 1\text{FH}$ . Sumergir después la oblea en agua desionizada.
- 5.2. Lavar la oblea en agua corriente desionizada durante 5 minutos.
- 5.3. Soplar la oblea para secarla en nitrógeno seco y caliente.
- 5.4. Poner la oblea durante 5 minutos en una corriente de  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$ .
- 5.5. Oxidación seca con  $\text{O}_2$  seco durante 15 minutos.
- 5.6. Añadir vapor húmedo durante 20 minutos para oxidación húmeda, en oxígeno burbujeando en agua a  $95^{\circ}\text{C}$ .
- 5.7. Redistribuir durante 17 horas en corriente de nitrógeno.
- 5.8. Sacar el bote al extremo del horno para que se enfríe 2 minutos.

#### 6. DEPOSITO DE LA RESINA FOTSENSIBLE.

Repetir la operación 3 con otra máscara.

#### 7. DIFUSION DE LA BASE.

- 7.1. Soplar la oblea con  $\text{N}_2$  seco y caliente.
- 7.2. Limpiar la oblea en 40%  $\text{SO}_4\text{H}_2$  y 60%  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Sumergirla en agua desionizada.
- 7.3. Lavar la oblea en agua desionizada corriente, durante 5 minutos.
- 7.4. Atacar la oblea en  $\text{CH}_2\text{O} + 1\text{FH}$ . Sumergirla en agua desionizada.
- 7.5. Lavar la oblea 5 minutos en agua desionizada.
- 7.6. Secar la oblea con nitrógeno seco y caliente.
- 7.7. Se purga 5 minutos con nitrógeno (25 cm  $\text{H}_2\text{O}$ ) el horno de deposición de boro.
- 7.8. Se precalienta durante minutos la oblea en el tubo de deposición de boro. En corriente de  $\text{N}_2$  con presión de 25 cm  $\text{H}_2\text{O}$ .
- 7.9. Deposición de boro durante 8 minutos en corriente de  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  con presiones 30 y 10 cm de  $\text{H}_2\text{O}$  respectivamente.

- 7.10 Se purga el horno con  $N_2$  durante 5 minutos con el bote en el centro - del tubo del horno.
- 7.11 Se lleva el bote al extremo del tubo de cuarzo para que se enfríe durante 2 minutos.
- 7.12 Se almacena la oblea en atmósfera limpia y seca a 300°C.

8. LIMPIEZA DE LA OBLEA Y REDISTRIBUCION DE LAS IMPUREZAS DE LA BASE.  
(1160°C).

- 8.1. Repetir las etapas 5.1 a 5.3.
- 8.2. Conectar los gases de 8.3 durante cinco minutos.
- 8.3. Oxidación seca con  $O_2$  durante 5 minutos ( $N_2$  y  $O_2$  a 25 cm  $H_2O$ )
- 8.4. Oxidación húmeda (25 cm  $N_2$ , 25 cm  $O_2$  sobre  $H_2O$  a 950°C).
- 8.5. Oxidación seca durante 5 minutos.
- 8.6. Enfriar el bote durante 2 minutos en el extremo del tubo.
- 8.7. Almacenar la oblea en atmósfera limpia y seca a 300°C.

9. FOTORESINA PARA DIFUSION DEL EMISOR.

Repetir 3 con la máscara de emisor.

10. DIFUSION DEL FOSFORO DE EMISOR (1050°C).

- 10.1. Repetir 4.1 a 4.5.
- 10.2. Purgar el tubo del horno de difusión del fósforo, con  $N_2$  durante 5 minutos con la oblea en el extremo del tubo.
- 10.3. Precalentar el bote y la oblea durante cinco minutos a 1050°C  $N_2$  cm  $H_2O$ .
- 10.4. Difusión de fósforo 5 minutos ( $O_2$  10 cm  $H_2O$ ,  $N_2$  25 cm  $H_2O$ ,  $N_2$  5 cm  $H_2O$ ).
- 10.5. Purgar el tubo y la oblea 5 minutos en corriente de 25 cm de  $N_2$ .
- 10.6. Almacenar la oblea en atmósfera limpia y seca durante 5 minutos.

11. REDISTRIBUCION DE EMISOR (1100°C) Y LIMPIEZA DE LA OBLEA.

- 11.1. Atacar la oblea con 6 partes de agua desionizada y una parte de FH, durante un minuto para eliminar la capa superficial de vidrio de fosfossilicato.
- 11.2. Lavar la oblea en agua desionizada durante 5 minutos.
- 11.3. Sacar la oblea con  $H_2$  seco y caliente.
- 11.4. Purgar el tubo con  $N_2$  durante 5 minutos.
- 11.5. 5 minutos de oxidación seca.
- 11.6. 5 minutos de oxidación húmeda.
- 11.7. 5 minutos de oxidación seca.



11.8. Enfriar la oblea 2 minutos en el extremo del tubo.

11.9. Almacenar la oblea.

## 12. FOTORESINA PARA LAS VENTANAS DE METALIZACION DE CONTACTOS.

Repetir 3 con la máscara de contactos. El tiempo de ataque en 3.11 será de 5 minutos.

## 13. METALIZACION.

13.1. Limpiar la oblea en 6 partes de agua desionizada y una parte de FH, durante 10 segundos.

13.2. Lavar la oblea en agua corriente desionizada durante 5 minutos.

13.3. Secar la oblea en  $N_2$  seco y caliente.

13.4. Colocar la oblea en la campana evaporadora y cargar el evaporador con la dosis exacta de aluminio.

13.5. Hacer un vacío de  $5 \times 10^{-6}$  mm Hg.

13.6. Precalentar el evaporador e indirectamente la oblea.

13.7. Poner la pantalla entre el evaporador y la oblea.

13.8. Subir la corriente del evaporador a su valor requerido y quitar la pantalla.

13.9. Dejar enfriar el sistema.

13.10 Introducir aire filtrado.

## 14. FOTORESINA PARA INTERCONEXIONES.

Repetir 3 con una máscara adecuada. (En este caso hay ligeras variaciones en los parámetros empleados).

## 15. ATAQUE DEL ALUMINIO.

15.1. Atacar hasta que se elimine el aluminio, con una solución de 80 cc de  $PO_4H_3$ , 4 cc de  $NO_3H$  y 18 cc de  $H_2O$ , a  $50^\circ C$ . Se detiene el ataque sumergiendo la oblea en agua desionizada.

15.2. Lavar la oblea en agua corriente desionizada.

15.3. Eliminar la fotorresina con un útil especial caliente y con movimiento ultrasónico.

15.4. Lavar la oblea con tricloroetileno y ultrasonidos.

15.5. Lavar la oblea con metanol.

15.6. Almacenar la oblea.

## 16. ALEACION DE LOS CONTACTOS ( $400^\circ C$ ).

16.1. Secar la oblea con  $N_2$  seco y caliente.

16.2. Purgar el tubo del horno con  $N_2$  durante 5 minutos con la oblea en un bote de cuarzo en el extremo del tubo.

16.3. Llevar solo un instante el bote al centro del tubo a 400°C, para que tenga lugar la aleación.

16.4. Purgar el tubo del horno durante 5 minutos con  $N_2$ .

#### 17. P R U E B A.

17.1. Colocar la oblea en un plato al que se sujeta por succión de vacío.

17.2. Colocar el soporte con las puntas de prueba, encima de la oblea.

17.3. Alinear las puntas de prueba sobre un circuito.

17.4. Apoyar las puntas de prueba sobre un circuito y medir.

17.5. Repetirlo en todos los circuitos y señalar los malos.

#### 18. SEPARACION DE LOS CIRCUITOS.

18.1. Colocar la oblea sobre un papel adhesivo.

18.2. Montarla en el aparato de rayado y alinear la oblea. Sujetarla con succión de vacío.

18.3. Rayar con punta de diamante el espacio intercircuital, en dos direcciones perpendiculares.

18.4. Soplar para eliminar las esquirlas de silicio.

18.5. Colocar la oblea entre dos papeles de filtro. Colocarla con la cara hacia abajo sobre una tela de caucho y pasar por encima un rodillo para partir las porciones.

18.6. Separar las porciones.

#### 19. SOLDADURA A LA CÁPSULA (Temperatura eutéctica Au-Si).

19.1. Asegurar la temperatura del soporte.

19.2. Colocar la base de la cápsula en el soporte caliente, para que en 10 segundos se caliente.

19.3. Colocar el "chip" en la base de la cápsula y con unos cilindros de vidrio arrastrar el "chip" para que toque bien con la aleación eutéctica y quede bien orientado respecto a la cápsula.

19.4. Retirar la base de la cápsula con el "chip" y dejarla enfriar unos segundos.

#### 20. SOLDADURA DE LOS HILOS (Método ultrasónico).

20.1. Colocar la cápsula en un soporte magnético.

20.2. Apretar el pedal para llevar la herramienta a su posición inicial.

20.3. Colocar el circuito, con los microposicionadores, de forma que el terminal y su ventana de soldadura estén alineados bajo el microscopio.

20.4. Soldar un hilo en el terminal.

20.5. Llevar el hilo hasta la ventana de soldadura.

20.6. Segunda soldadura.

20.7. Repetir lo mismo en todas las soldaduras.

20.8. Inspeccionar el circuito.

21. PRUEBA ELECTRICA.

22. ENCAPSULADO.



## 67. CAPAS DELGADAS.

### 67.1 GENERALIDADES.

Las capas delgadas o películas finas (espesor menor que 10.000 Å) son de gran aplicación en Electrónica, por dos motivos esenciales:

- 1) Compacticidad: Una resistencia de película fina de dimensiones de 400 Å de grueso y 1 mil de ancho tiene 500 veces la resistencia por unidad de longitud de un hilo de 1 mil del mismo material.
- 2) Integración: Permite fabricar muchos componentes interconectados entre sí en un mismo soporte formando "circuitos integrados de película fina"

Cuando se unen otros componentes, como diodos o transistores, se forman los llamados "circuitos híbridos". Esta integración presenta ventajas tales como: bajo coste, reproducibilidad, buenas características y especialmente fiabilidad.

Otras ventajas de gran interés en Electrónica son: la posibilidad de obtener coeficientes de temperatura determinados y obtener redes de parámetros distribuidos.

Se emplean las películas finas, no solamente en aplicaciones de electrónica, sino también en instrumentos ópticos y en aparatos para almacenamiento magnético de la información. Recientemente se han empleado las películas finas para estudiar la relación existente entre la estructura de un sólido y sus propiedades físicas.

La película se forma depositando el material que la constituye sobre un soporte o sustrato limpio. El espesor de la película varía según la aplicación, en Electrónica está comprendido centésimas de milímetro y decenas de Angstroms.

La estructura de estas películas puede ser amorfa (como en el caso de los dieléctricos de óxido anódico), o de un solo cristal (silicio crecido epitaxialmente); sin embargo, la mayoría de ellas se encuentran comprendidas entre estos extremos y son policristalinas, formadas por muchos cristalitas, cuyo tamaño en el caso de películas muy finas es función del espesor, mientras que en las más gruesas depende de los parámetros de la deposición tales como la temperatura del soporte y la proporción de esta deposición; incluso después de depositada la película continua variando el tamaño de los cristales, creciendo unos a expensas de los más pequeños.

### 67.2 METODOS DE DEPOSICION DE PELICULAS.

Se han desarrollado varios procesos de obtención de las películas finas, que se emplean indistintamente según los usos a que esté destinada la película, el material que la constituya y el material del soporte.

Se pueden clasificar los métodos en 3 tipos: Evaporación al vacío, Pulverización catódica y Químicos.

#### 67.2.1 EVAPORACION AL VACIO.

Consiste en la obtención de películas finas mediante el calentamiento de un material a temperatura tal que gran número de átomos o moléculas abandonen la superficie del material para depositarse sobre un soporte frío; esto se realiza en una cámara en la que se ha -

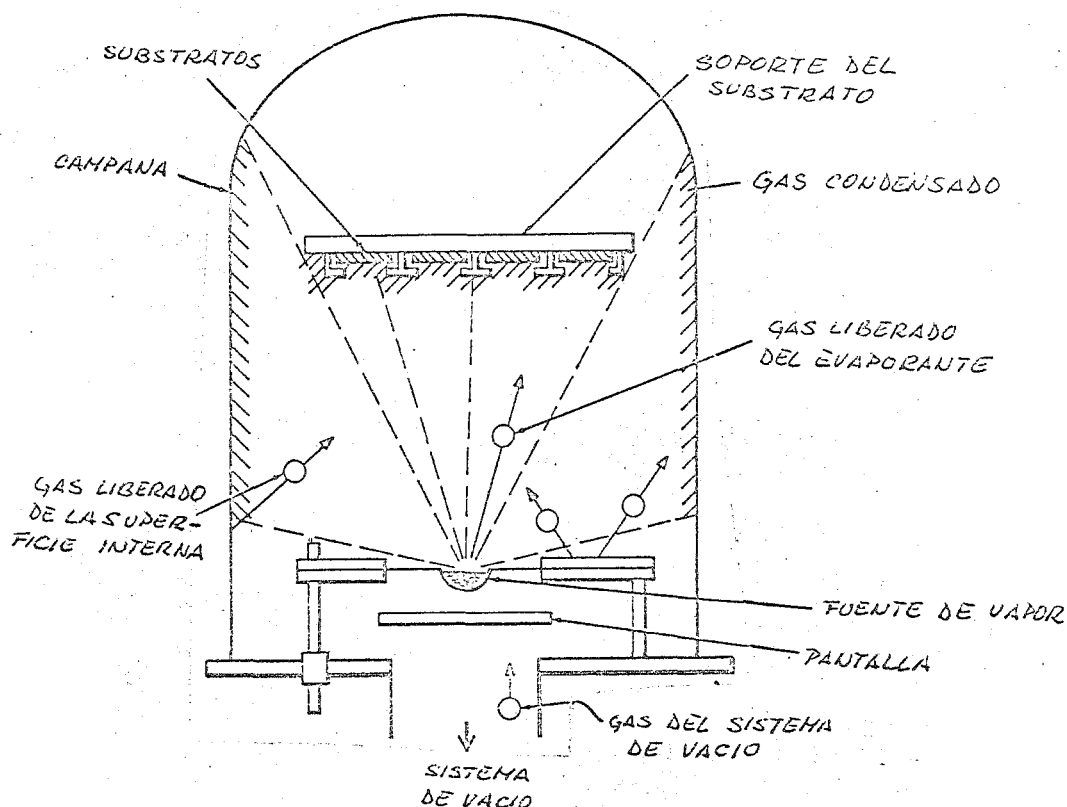
hecho el vacío con objeto de evitar colisiones entre las moléculas evaporadas y las del gas residual, consiguiéndose que se desplacen según una trayectoria recta.

Se pueden distinguir en este proceso 3 etapas:

- 1) Transición de un estado condensando (sólido o líquido) a un estado gaseoso.
- 2) Trayectoria del vapor entre la fuente de evaporación y el soporte a una presión del gas muy reducida.
- 3) Condensación del vapor sobre el soporte.

#### 2.1.1 SISTEMA DE EVAPORACION.

Un sistema de evaporación consta esquemáticamente de las partes siguientes:



- Cámara de vacío.
- Fuente de evaporación, donde se deposita el material para su calentamiento.
- Substratos, soportes que se recubren con el evaporante.
- Sujetador y calentador del sustrato.

#### 2.1.2 FUENTES DE EVAPORACION.

Muchos materiales para evaporarse requieren temperaturas entre 1.000°C y 2.000°C, lo cual significa que los metales empleados en las fuentes deberán de tener un punto de fusión muy alto y ser muy poco volátiles. Metales con estas características son el tungsteno, tantal, platino, molibdeno, etc., de los que los más utilizados con el tungsteno y el molibdeno.

El calentamiento proviene de un hilo metálico a alta temperatura por efecto Joule.

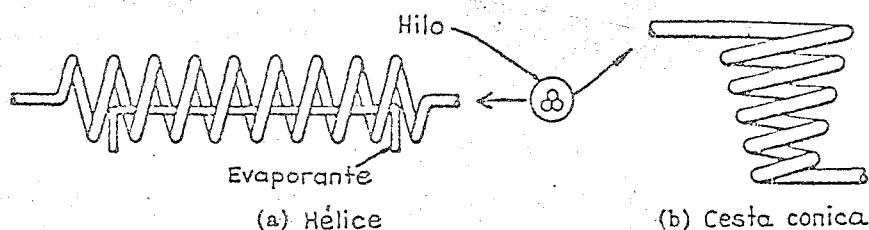
Estas fuentes deben de cumplir los requisitos siguientes:

1. Suministrarán la temperatura necesaria para la evaporación, al tiempo que mantendrá su estabilidad estructural.
2. Su presión de vapor a la temperatura de trabajo debe ser lo bastante baja para que una pequeña cantidad de material de la fuente se evapore.
3. Deben de sostener la carga que se va a evaporar.
4. No deben combinarse químicamente o formar aleación con la carga que normalmente está fundida.

Generalmente son de filamentos o de láminas.

a) Filamentos.

Comercialmente se dispone de fuentes de calentamiento por resistencia formada por hilos de tungsteno o filamentos. Las formas que adoptan comúnmente son las de las figuras adjuntas.



*FUENTES DE EVAPORACION DE FILAMENTO*

En el primer caso, se coloca en el interior de la hélice calefactora, formada por espiras, de cordón de 3 hilos de tungsteno entrelazados, un trozo de hilo del material a evaporar. El segundo de cesta cónica se emplea para el material troceado o granular.

Por el filamento se hace pasar una corriente de unos 100 A, hasta alcanzar una temperatura de 1.600°C, fundiendo el material que fluye por el tungsteno y se evapora.

Esto tiene el inconveniente de que el material forma con el tungsteno una aleación de punto de fusión bajo, por lo cual acorta la vida del filamento.

Además no se puede controlar fácilmente la velocidad de evaporación, debido a que al disminuir la masa del material por evaporación, cambia la resistencia efectiva del filamento.

b) Láminas.

Cuando se desea mayor evaporación y según direcciones determinadas, se emplean láminas metálicas como elementos calefactores. Como los representados en la figura.



### FUENTES DE EVAPORACION DE LAMINA METALICA

Donde (a) y (b) son similares, con excepción, de los pliegues complejos de la lámina metálica para evitar deformaciones a causa de las altas temperaturas.

Tiene el inconveniente de necesitar corrientes muy grandes, debido a su mayor superficie de radiación, así como la contaminación de la película por el material de la fuente.

#### c) Sublimación.

También se puede evaporar el material sublimándolo, para lo cual se pasa una fuerte corriente a través de un filamento del mismo material, que se calienta hasta producirse la sublimación.

La evaporación en este caso es lenta y el control se puede efectuar pensando el filamento antes y después de la evaporación. se debe de cuidar la temperatura para evitar la fusión del hilo.

#### 67.2.1.4 CALENTAMIENTO POR BOMBARDEO ELECTRONICO.

Es una nueva fuente de calentamiento que evita los inconvenientes de las anteriores.

Estas fuentes normalmente incorporan un cátodo caliente que emite electrones, una alta tensión para acelerarlos, un ánodo que frecuentemente es el propio evaporante, y en ocasiones un método de enfoque de los electrones.

Sus ventajas principales son:

1. El calor puede ser generado directamente en el evaporante.
2. El soporte para el evaporante debe ser enfriado, eliminando interacciones entre ambos y evaporaciones no deseadas del material del soporte.
3. Se pueden evaporar materiales refractarios como el tántalo y el tungsteno.
4. La cantidad de calor radiada por la fuente es reducida, puesto que solamente se calienta el evaporante.
5. Se reduce el grado de ataque del soporte por el evaporante, alargando la vida de la fuente y eliminando contaminaciones.

Las desventajas son:

1. El equipo es más complicado y por tanto las modificaciones por el usuario son más difíciles.
2. El bombardeo de electrones disocia, al menos parcialmente, más compuestos.



3. Las moléculas de gas residual y parte del vapor evaporante se -  
pueden ionizar por los electrones.

38

Las fuentes de este tipo presentan ciertos problemas de diseño, que se detallan a continuación, así como la forma de resolverlos.

a) Cátodo caliente.

Deben de ser de construcción robusta. No es recomendable el empleo de cátodos recubiertos de óxido, como en las válvulas termoiónicas, debido a su fácil contaminación por los gases residuales o por las moléculas de vapor al condensarse sobre su superficie.

Generalmente se usan cátodos incandescentes de tungsteno, en los que al condensarse las moléculas de vapor sobre su superficie, se evaporan rápidamente por la alta temperatura necesaria para la emisión electrónica.

Recubriendo el filamento de tungsteno por óxido de torio, que cuando se contamina es fácilmente renovable, se obtiene un incremento de la emisión electrónica.

Para una temperatura determinada, el tántalo de una mayor emisión electrónica que el tungsteno, pero se ha comprobado que su emisión es pobre cuando se utilizan en vacíos como los necesarios para este tipo de fabricación.

b) Corriente electrónica y ionización.

La carga espacial, para temperatura inferior a la de saturación es:

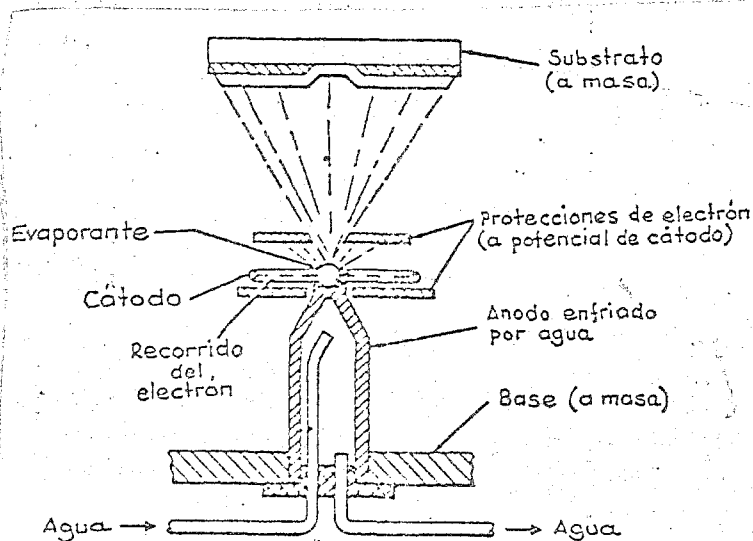
$$i = K \cdot V^{3/2}$$

donde K es una constante que depende de la construcción geométrica de los electrodos.

En el caso de electrodos de placas paralelas separadas d cm. es:

$$i = \frac{2,325 \times 10^{-6}}{d^2} \times V^{3/2} \quad \text{Amp/cm}^2$$

Si se trata de un generador de bombardeo electrónico formado por un cátodo de hilo de tungsteno, arrollado en forma de espira plana y colocado enfrente del soporte del material a evaporar, según la



figura, y para tensión entre electrodos de  $V = 1000v$ , como la densidad de corriente necesaria es de  $0,1 \text{ A/cm}^2$ . Suponiendo los electrodos paralelos y despreciando el efecto de bordes, resulta de la fórmula anterior una separación entre cátodo y ánodo de  $0,86 \text{ cm}$ .

Para una potencia de entrada igual, pero con  $V = 5000v$  y  $i = 0,02 \text{ A/cm}^2$  se obtiene  $d = 6,4 \text{ cm}$ .

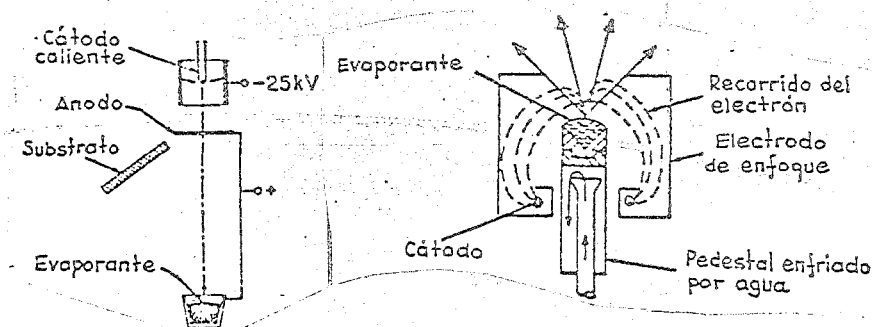
FUENTE DE EVAPORACION POR BOMBARDEO ELECTRONICO SIN ENFOQUE.

Ahora bien, esta separación entre electrodos, puede ser superior a la calculada, debido a que la presión residual no suele ser lo suficientemente baja como para conseguir las condiciones de carga espacial completa, puesto que ésta se neutraliza parcialmente por los iones procedentes de la ionización del gas residual.

Con el montaje de la figura anterior, las fluctuaciones en la corriente de bombardeo, debidas a que el material que se va a evaporar desprende periódicamente sus oclusiones gaseosas, perturban el control de la fuente. Igualmente los átomos de vapor influyen al chocar contra la superficie del cátodo, lo cual no afecta a la emisión del tungsteno incandescente por evaporarse rápidamente las moléculas condensadas.

Esta inestabilidad de funcionamiento se puede reducir mediante un enfoque del rayo electrónico sobre el material a evaporar; esto se consigue, con un ánodo auxiliar que puede tener diferentes formas, como un cilindro hueco, disco o el de figura sobre el filamento.

Este electrodo de enfoque se construye de molibdeno o tantalio.



FUENTES DE EVAPORACION POR BOMBARDEO ELECTRONICO ACELERADO CON ENFOQUE

#### 67.2.1.5 ESPESOR DE LAS PELICULAS OBTENIDAS POR EVAPORACION Y DISTRIBUCION DEL ESPESOR.

El espesor de las películas obtenidas por evaporación puede variar entre unos pocos y 20.000 Å, para espesores superiores a los 20.000 Å se deben de solucionar, todavía, los problemas que se presentan de manejo de cargas grandes, tiempos de evaporación largos y calentamiento excesivo de las superficies interiores del sistema de vacío.

La condición esencial que se debe de cumplir es que el espesor sea lo más uniforme posible, pues de lo contrario, la estabilidad disminuirá notablemente.

Los cálculos teóricos de distribución de espesores se utilizan, a menudo, para determinar la posición relativa de la fuente respecto del sustrato y para estimar la cantidad de evaporante requerida.

#### 67.2.1.6 DISTRIBUCION TEORICA DEL ESPESOR DE LA PELICULA.

El espesor de la película evaporada depende de las características emisivas de la fuente, su geometría, de la posición relativa de fuente y sustrato, y de la cantidad de material vaporizado.

Para determinar el espesor de la película y sus propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas o mecánicas, se deben de realizar controles durante el proceso de deposición y posteriormente medidas.

Se estudia a continuación los casos de fuente puntual y fuente plana.

Para este estudio teórico se hacen las tres suposiciones siguientes:

1. La evaporación se realiza a una presión de gas lo suficientemente baja para que puedan despreciarse las colisiones de las moléculas de vapor con las moléculas de gas.
2. La intensidad de evaporación es tan baja que se puede despreciar el efecto de las colisiones entre moléculas de vapor en la proximidad de la fuente.
3. Las moléculas de vapor cuando chocan con la superficie receptora se condensan inmediatamente.

Las tres suposiciones se verifican en sustancias con temperatura de evaporación superior a 1.000°C.

a) Fuente puntual.

Se considera una esfera emisora de dimensiones pequeñas - respecto a la distancia a que están las superficies receptoras. Se supone la temperatura uniforme en toda la superficie, con lo que la evaporación, por simetría, será así mismo uniforme en todas las direcciones.

Si la masa total evaporada es  $m_1$ , la cantidad de material  $dm_2$  incidente sobre una pequeña superficie receptora  $dS_2$ , es igual a la cantidad de material que pasa a través del ángulo sólido,  $d\Omega$ , subtendido en la fuente por la superficie.

Entonces 
$$d\Omega = dS_2 \frac{\cos \beta}{r^2}$$

y 
$$dm_2 = Cm_1 \cdot d\Omega = \frac{Cm_1 \cdot \cos \beta \cdot dS_2}{r^2} \quad (1)$$

Donde C es una constante de proporcionalidad que se puede calcular por integración sobre la superficie receptora completa. Para ello como esta superficie es una esfera con centro en la fuente:  $\beta = 0$ ,  $dS_2 = 2 r^2 \pi \sin \theta \cdot d\theta$ , e integrado a toda la esfera:

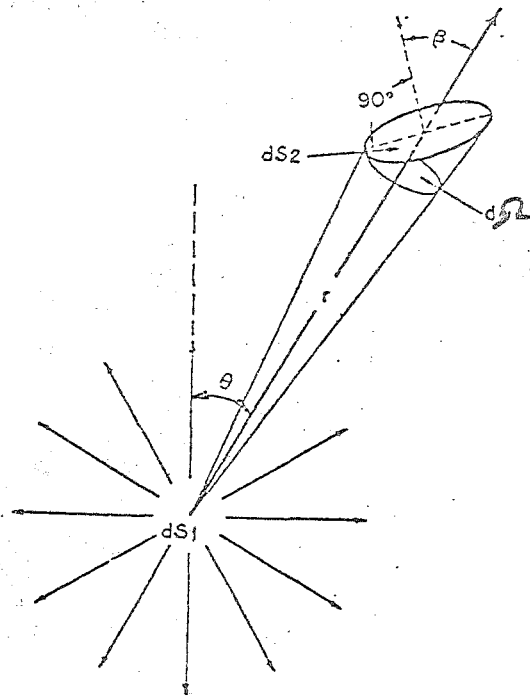
$$\int dm_2 = Cm_1 \cdot 2 \pi \int_0^\pi \sin \theta \cdot d\theta \quad m_2 = Cm_1 \cdot 4 \pi$$

luego si  $m_2 = m_1$  será  $C = \frac{1}{4 \pi}$

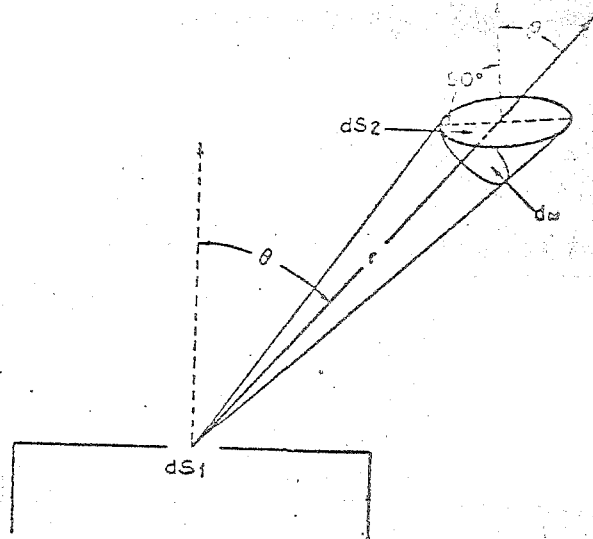
Por tanto en (1) es 
$$dm_2 = \frac{m_1 \cdot \cos \beta \cdot dS_2}{4 \pi r^2}$$

b) Fuente plana pequeña.

Se considera una pequeña superficie emisora plana, cuya temperatura es uniforme. Conforme a la hipótesis de Knudsen esta fuente tiene propiedades emisivas direccionales, tales como que la cantidad de material evaporado en el ángulo  $\theta$  o de emisión, es proporcional a  $\cos \theta$ . Como se muestra en la figura,  $\theta$  es el ángulo entre la normal al plano de la fuente y una línea entre la fuente y la superficie receptora.



EVAPORACION DE UNA FUENTE PUNTUAL  $dS_1$  SOBRE UN ELEMENTO  $dS_2$  DE SUPERFICIE RECEPTORA.



EVAPORACION DE UNA FUENTE PLANA PEQUEÑA  $dS_1$  SOBRE UN ELEMENTO DE SUPERFICIE  $dS_2$ :

La ecuación (1) debe de cambiar para introducir esta propiedad direccional  $\gamma$ :

$$dm_2 = C m_1 \cdot \cos \theta \, d\Omega =$$

$$\frac{C \cdot m_1 \cdot \cos \theta \cdot \cos \beta \cdot dS_2}{r^2} \quad (3)$$

Como para la fuente plana - la emisión está limitada a un hemisferio, si se integra (3) sobre este hemisferio se obtiene

$$C = \frac{1}{\pi}$$

Luego:  $dm_2 =$

$$\frac{m_1 \cdot \cos \theta \cdot \cos \beta \, dS_2}{\pi r^2} \quad (4)$$

#### 67.2.1.7 MASA Y ESPESOR DE LA PELICULA.

Suponiendo que el material a evaporar tiene una densidad  $\rho$  (gr/cm<sup>3</sup>) y el espesor de la película depositada por unidad de tiempo es  $e$  (cm/seg).

El volumen de material depositado en la superficie  $dS_2$  será:

$$dm_2 = \rho \cdot e \cdot dS_2$$

Con lo cual de (2) se tiene:  $e = \frac{m_1 \cdot \cos \beta}{4\pi r^2} \quad (5)$

y de (4) será:  $e = \frac{m_1 \cos \theta \cos \beta}{\rho \pi r^2} \quad (6)$

para fuente puntual y plana respectivamente.

Las expresiones (5) y (6) indican que aunque son similares, el máximo espesor para la fuente plana es 4 veces el de la fuente puntual. Todo ello para una cantidad de evaporante dada y una distancia de fuente a substrato también dada.

En la figura se representa la comparación de las distribuciones de espesor relativa a una fuente puntual y otra plana, y la superficie receptora es plana y paralela a la fuente ( $\theta = \beta$ ).

$$\text{Haciendo } \cos \theta = \cos \beta = \frac{h}{(x^2 + h^2)^{1/2}}$$

y  $r^2 = x^2 + h^2$ , las ecuaciones (5) y (6) se transforman en:

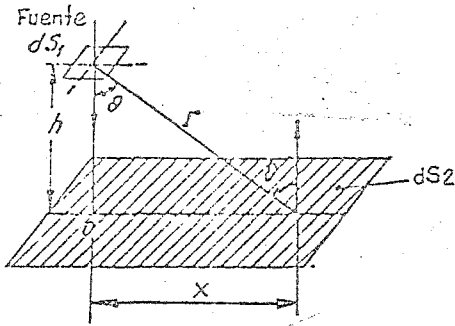
$$e = \frac{m_1 h^2}{4\pi \rho (x^2 + h^2)^{3/2}} \quad (\text{fuente puntual}) \quad (7)$$

$$e = \frac{m_1 h^2}{\pi \rho (x^2 + h^2)^2} \quad (\text{fuente plana}) \quad (8)$$

Como el espesor en el punto 0 debajo de la fuente es (para  $r = h$  y  $x = 0$ ):

$$e_0 = \frac{m_1}{4\pi \rho h^2} \quad (\text{fuente puntual}) \quad (9)$$

$$e_0 = \frac{m_1}{\pi \rho h^2} \quad (\text{fuente plana}) \quad (10)$$



Con lo que las relaciones de espesor serán:

$$\text{de (7) y (9): } \frac{e}{e_0} = \frac{h^3}{(x^2 + h^2)^{3/2}} = \frac{1}{1 + (\frac{x}{h})^2}^{3/2} \quad (\text{fuente puntual}).$$

$$\text{de (8) y (10): } \frac{e}{e_0} = \frac{h^2}{(x^2 + h^2)^2} = \frac{1}{1 + (\frac{x}{h})^2}^2 \quad (\text{fuente plana})$$

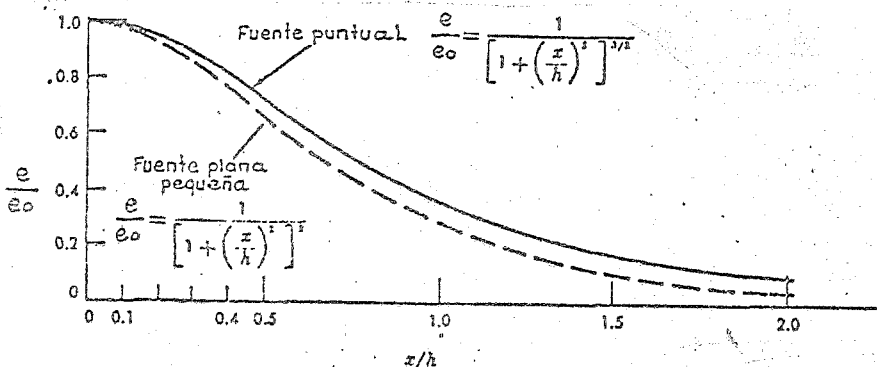
#### 67.2.1.8 METODOS DE PRODUCCION DE DEPOSITOS UNIFORMES.

1. Cuando la fuente es puntual simple los substratos se deben de colocar formando una esfera concéntrica con la fuente; de esta forma  $\cos \theta = 1$  y  $r$  es constante ( $r=R$ ).

Haciendo que el radio de la esfera grande con respecto a la mayor dimensión lineal del sustrato, se obtiene un depósito uniforme, puesto que en (5) es:

$$e = \frac{m_1}{\rho 4\pi r^2} = \frac{m_1}{4\pi \rho} \cdot \frac{1}{R^2} \quad \text{es decir es constante.}$$

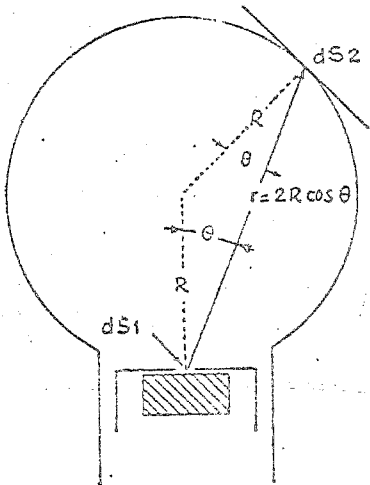
Con todos los substratos colocados en el plano, la relación  $x/h$  se minimizaría (como se puede ver en la figura) lo cual se hace normalmente incrementando  $h$ , con lo que resulta una disminución en el espesor del depósito para una cantidad de evaporante dada.



NOTAS:  
 $e_0$  = Espesor exactamente debajo de la fuente.

DISTRIBUCION DEL DEPOSITO SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA.

2. Cuando la fuente es plana pequeña simple, se distribuirían los substratos sobre la superficie de una esfera, con la fuente en algún punto de la misma esfera. Según se indica en la figura.



### EVAPORACION SOBRE UNA SUPERFICIE RECEPTORA ESFERICA.

Como  $\cos \theta = \cos \beta$  y  $r = 2.R.\cos \theta$ , se tendrá en (6)

$$e = \frac{m_1 \cdot \cos^2 \theta}{\rho \pi r^2} = \frac{m_1}{4\pi \rho} \cdot \frac{1}{R^2},$$

el espesor es constante, por tanto - también se ha obtenido un depósito - uniforme.

3. Con fuentes múltiples, las distribuciones de espesor corresponden a la combinada de cada una de las simples.

Una distribución particular consiste en varias fuentes pequeñas colocadas en un círculo sobre un plano paralelo a la superficie receptora.

#### 67.2.2 PULVERIZACION CATODICA.

Consiste en la obtención de películas finas mediante un bombardeo de un cátodo con partículas aceleradas (generalmente iones positivos), las cuales provocan la expulsión de átomos del cátodo que van a depositarse sobre un soporte. Este proceso se realiza en una cámara en la que se ha hecho el vacío.

La principal diferencia con el método de evaporación al vacío, consiste en que en aquel caso se requiere una energía térmica, mientras que en este es un bombardeo iónico. De esta forma este método permite depositar películas de material refractario sin necesidad de fuentes de temperatura muy elevada.

Los iones se forman por aplicación de un campo eléctrico elevado a un gas tal como argón a baja presión, apareciendo una descarga luminosa en la cámara de deposición. Estos iones cargados positivamente se aceleran mediante el campo, chocando con el cátodo del material que se quiere pulverizar, de cuya superficie saltan átomos que se condensan en el sustrato.

Este método ofrece ventajas sobre las restantes técnicas cuando se requiere alguna de las características o tipos de película siguientes:

- 1) Películas de varios componentes (aleaciones, mezclas, etc.).
- 2) Materiales refractarios.
- 3) Películas aislantes.
- 4) Buena adherencia película-sustrato.
- 5) Epitaxia a baja temperatura.
- 6) Uniformidad del espesor en grandes superficies planares.

Sin embargo no se puede usar cuando existen las limitaciones siguientes:

- 1) Fuente del material disponible en forma de hoja.
- 2) Proporción de la deposición inferior a 2000 Å/minuto.
- 3) Sustrato debe ser enfriado (excepto en veloc. muy pequeña)

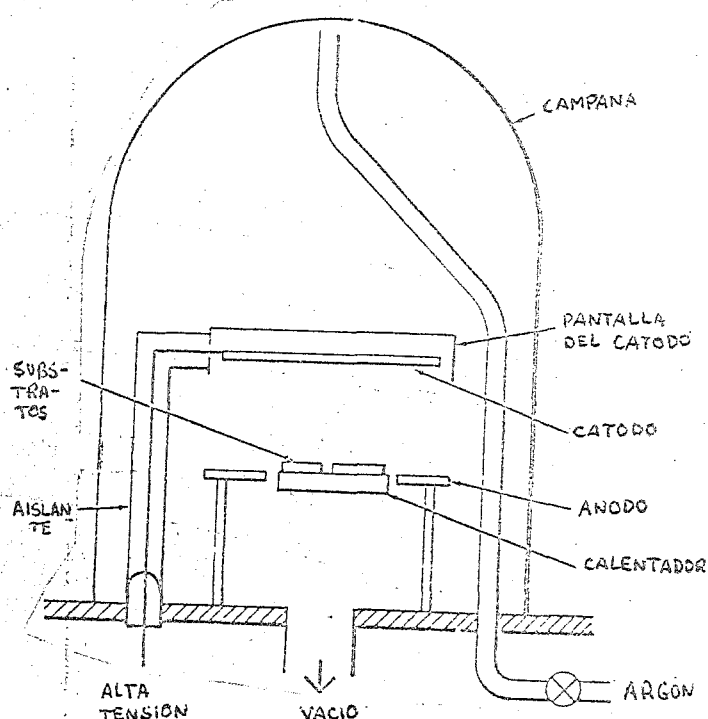
Una primera teoría postula que la pulverización se debe a la creación de una temperatura local muy elevada por el bombardeo iónico, con lo que la pulverización es proporcional al calor de sublimación y a la energía de los iones. Posteriormente se ha establecido otra teoría por la cual se la considera como un mecanismo que realiza una transferencia de los momentos desde el ión a los átomos, para ello se basa en las observaciones siguientes:

- 1) La distribución de los átomos despedidos del material tiende a concentrarse a lo largo de las direcciones de mayor densidad.
- 2) El rendimiento de la pulverización depende de la energía y de la masa de los iones.
- 3) Por debajo de cierto umbral de energía no se produce pulverización.
- 4) El rendimiento decrece con energías muy elevadas de los iones, probablemente debido a la penetración de los iones debajo de la superficie del material.

#### 67.2.2.1 SISTEMA DE PULVERIZACION.

Los iones positivos necesarios para la pulverización se generan provocando una descarga luminosa por aplicación de un alto potencial (1000-10000V) entre dos electrodos planos paralelos en una cámara a baja presión ( $10^{-5}$  mm Hg).

El aparato que utiliza para ello consta de un cátodo de gran área y un ánodo que calienta al sustrato, todo ello dentro de la cámara de vacío, así como un sistema de admisión del gas argón para la producción de la descarga.



#### 67.2.3 QUIMICOS.

Los métodos son, generalmente, más rápidos que los restantes y usan además equipos más sencillos; por lo que resultan ser más económicos. Sin embargo presentan inconvenientes tales como ser a menudo más complejos, de difícil control y de difícil reproducibilidad de las propiedades de las películas.

Hay varios métodos químicos de formación de película fina, como:

- 1) Electrolaminado: Aumenta la conductancia de las interconexiones.
- 2) Reducción química: Para resistencia de película de Níquel.
- 3) Laminado por vapor: Para deposición de transistores.
- 4) Anodización: para la formación de dieléctricos de condensadores y resistencias de tántalo.

#### 67.2.3.1 ELECTRODEPOSICION.

Es la producción de recubrimientos metálicos por acción de la corriente eléctrica.

El sistema consta de dos electrodos (ánodo y cátodo) unidos por la batería e introducidos en el electrolito de un baño.

Se produce un movimiento de iones a través de la solución que van a depositarse sobre el cátodo.

El proceso se rige por las leyes de la electrolisis:

- 1) El peso del metal depositado es proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado.
- 2) El peso del material depositado por cualquier control de electricidad es proporcional al equivalente electroquímico.

Factores que influyen en las propiedades de la película: Electrolito, electrodos, densidad de corriente, impurezas, temperatura, viscosidad y tensión superficial de la solución.

#### 67.2.3.2 REDUCCION QUIMICA.

Consiste en el depósito de una película metálica sobre el soporte mediante una reacción química, sin necesidad de aplicar potenciales. Se pueden distinguir 4 tipos de reacción:

##### 1) Reacciones no catalíticas:

Tal es el caso de metalizado de vidrios y porcelanas con plata, esta se encuentra en una disolución amoniacal de nitrato de plata; mediante la adición de un agente reductor (como azúcar, sal de Rochela, o formaldehído), se precipita la plata.

##### 2) Reacciones catalíticas:

En estas el metal se deposita solamente sobre ciertas superficies de otros metales. Por ejemplo se puede conseguir la deposición de níquel, por medio de una reducción de  $\text{NiCl}_2$  por hipofosfito de sodio, sobre una superficie de níquel, cobalto, acero o aluminio, que actúa además de como soporte, como catalizador.

##### 3) Reacciones catalíticas usando activadores:

Los metales que actúan como catalizadores (caso anterior) son limitados; se puede proceder entonces a activar los metales no catalíticos. El activador desciende la energía para la reacción de reducción en puntos particulares de la superficie y el metal se deposita en estos puntos.

##### 4) Reacciones catalíticas usando activadores y sensibilizadores:

En el caso de superficies no metálicas se requiere una sensibilización antes de la activación. Se emplea para recubrir superficies de difícil acceso, como interior de tubos electrónicos.

Sin embargo por este procedimiento las películas no son mecánicamente fuertes y es difícil de controlar el periodo de precipitación, con ello el espesor de la película. Por este motivo no son adecuadas para fabricaciones masivas, aunque son generalmente más rápidas y utilizan un equipo más sencillo, con lo cual resultan más económicos.

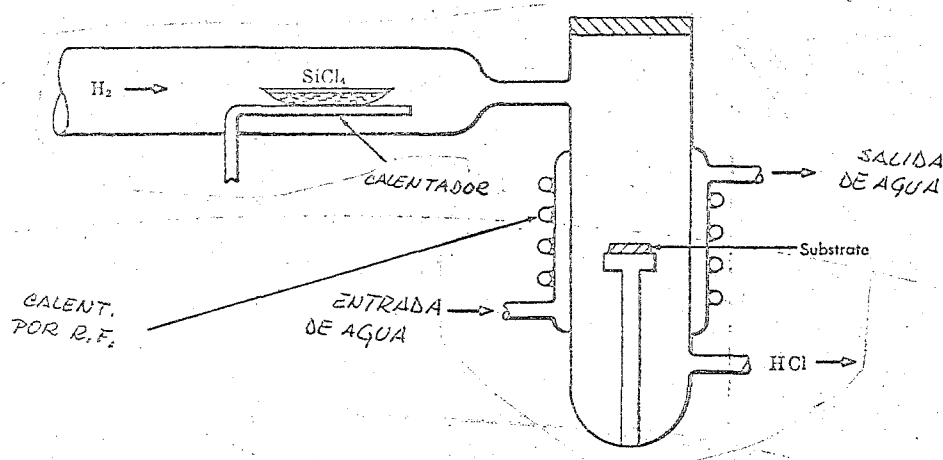


### 67.2.3.3 DEPOSICION POR VAPOR.

El método consiste en vaporizar un compuesto volátil de la sustancia que se va a depositar, reduciéndolo o descomponiéndolo térmicamente sobre una superficie caliente. Permite depositar metales refractarios con un espesor mucho mayor que por otros procedimientos. Su mayor limitación, es sin embargo, la necesidad de calentar el objeto a alta temperatura.

En algunos casos se facilita la descomposición con un agente reductor tal como hidrógeno.

Esta técnica se utiliza para el crecimiento epitaxial de películas monocristalinas, particularmente de silicio.



El mecanismo de la deposición consiste en evaporar el compuesto volátil por calor y hacer pasar un gas reactivo sobre él; la corriente gaseosa alimenta en forma continua la superficie del sustrato donde se difunde. La reacción tiene lugar sobre el sustrato caliente.

Los factores que afectan a la deposición son: la circulación

del gas, la presión y la temperatura. Mientras que la contaminación por impurezas causa defectos estructurales en la película.

### 67.2.3.4 ANODIZADO.

Es la producción de una cubierta de óxido o hidróxido de metal mediante la oxidación electroquímica de un ánodo de metal en el interior de un electrolito. Este tipo de oxidación está limitado a pocos metales, los que permiten obtener películas coherentes son: aluminio, antimonio, bismuto, titanio, tungsteno, circonio y tantalio.

La producción se realiza en una cuba electrolítica con un cátodo inerte y un ánodo del metal considerado, la electrolisis hará crecer la película de óxido en el ánodo.

La resistencia aumenta con el espesor de la película y puede llegar a ser de miles de megohmios por centímetro cuadrado; la deposición se realiza en corriente controlando simultáneamente el proceso se interrumpe cuando se alcanza la resistencia requerida.

Las características eléctricas de las películas así obtenidas dependen de su estructura y de los defectos en la misma, tales como huecos, impurezas y desplazamiento de iones.

67.2.4 APLICACIONES DE LOS METODOS DE PREPARACION.

	Electrodeposición.	Reducción química.	Deposición por vapor.	Anodizado.	Términos.	Evaporación	Pulverización.
Resistencias conductores.							
Condensadores Aisladores.							
Elementos activos.							
Materiales magnéticos.							
Superconductor.							

El rayado simple indica que el componente se puede preparar por este método.

El rayado cruzado indica que el método se usa ampliamente.

67.3 MEDIDA DEL ESPESOR DE LA PELICULA.

Para establecer las características de una película es necesario conocer su espesor. Aunque para ello se pueda hacer una medida directa, a veces es más fácil medir algún parámetro de la película que depende del espesor. Con lo que se calcula el espesor del dato obtenido, o bien se utiliza el propio parámetro para controlar el proceso de deposición.

Se define el espesor como la distancia, según una perpendicular a la superficie, entre un punto en una cara de la superficie y otro en la cara opuesta.

Cuando las dos caras no son paralelas (o son rugosas) no queda bien definido el espesor, afortunadamente mediante la deposición en vacío, las caras son lisas y paralelas.

Las técnicas de medida que se aplican después de retirar el sustrato del sistema de vacío son:

1. Peso: Se pesa la masa de la película y se calcula el espesor - partiendo de la densidad del material en bloque.
2. Estilete: Un estilete de diamante atraviesa un escalón de la - película de sustrato. El movimiento vertical del estilete res- pecto de una referencia plana se convierte en una señal eléc- trica que se amplifica y graba.
3. Interferómetro de haz múltiple: Mediante un rayo luminoso que experimenta reflexiones entre el sustrato y el nivel de refe- rencia, formando franjas que determinan el espesor.

4. Dispersión de partículas beta: Se dirigen las partículas beta (electrones de alta energía) hacia la película, se estima el espesor por las partículas que se dispersan.
5. Fluorescencia por rayos X: Se estima el espesor mediante la intensidad de los rayos X secundarios característicos de la película que son excitados por los rayos X primarios que se la dirigen.

#### 67.4 SUBSTRATOS.

Las películas finas no puede soportarse por si mismas, por lo que se necesitan una base o sustrato, que no debe tener ningún tipo de interacción con la película excepto para servirla de soporte con la suficiente adherencia.

El sustrato debe de ser compatible con el proceso de deposición y con todos los siguientes de manejo.

Con este criterio se ha preparado la siguiente lista de propiedades deseadas en un sustrato ideal.

<u>Propiedad deseada</u>	<u>MOTIVO</u>
Superficie atómicamente pulida	Película uniforme.
Perfectamente liso	Definición de la máscara.
Sin porosidad	Evitan salida excesiva de gases.
Fortaleza mecánica	Prevenir roturas
Coefficiente térmico de expansión igual al de la película.	Prevenir roturas y tensiones en la película.
Conductividad térmica alta	Evitar calentamiento de los componentes.
Estabilidad térmica	Permite calentar durante el proceso.
Estabilidad química	Permite el uso ilimitado de agentes.
Resistencia eléctrica alta	Aislamiento.
Bajo costo	Aplicación comercial.

No existe un material ideal para el sustrato, por ello las propiedades enumeradas se deben de aplicar en orden al empleo que se dará al circuito, para elegir así el más idóneo en cada caso; teniendo en cuenta además que en la práctica el sustrato ejerce una influencia considerable sobre las características de la película.

##### 67.4.1 FABRICACION DEL SUBSTRATO.

Los métodos utilizados para fabricar sustratos pueden afectar a sus propiedades y dependen del material.

##### 67.4.1.1 VIDRIO.

El vidrio plano se fabrica siguiendo tres técnicas diferentes:

1. Producción de hojas de vidrio: Se hace fundiendo los ingredientes en un horno de tipo tanque, en el que los materiales entran por un extremo, se funden y sale una banda de vidrio por el otro lado.
2. Producción de placas de vidrio: el vidrio fundido fluye por la parte baja del tanque por gravedad, pasando a través de unos rollos que le dan forma, afilan y pulen sus superficies.
3. Producción de vidrio flotante: Implica el movimiento de una banda de vidrio fundido a través de un depósito de estaño fundido. El estaño tiene su punto de fusión más bajo que el vidrio y éste queda soportado en el estaño fundido.

#### 67.4.1.2 CERAMICO.

Consiste generalmente en granos sinterizados del componente de mayor proporción unidos por vidrio, presentan una resistencia a la fractura debido a la fortaleza intrínseca de los granos.

La técnica de formación con el espesor que se vaya a dar al sustrato.

#### 67.4.1.3 ZAFIRO SINTETICO.

Es alúmina ( $Al_2O_3$ ) conocida como  $\alpha$ -alúmina o zafiro. Para sintetizarlo se emplea sulfato de aluminio y antimonio que se purifican por recristalización y se calcinan en un horno. Después se pulverizan y éste polvo se calienta a la llama para formar el cristal del sustrato.

#### 67.4.2 SUPERFICIE DEL SUBSTRATO.

La calidad de la superficie es la propiedad más importante del sustrato, puesto que en ella tiene lugar la interacción entre él y la película. Hay varios tipos de irregularidades que influyen en la cotextura general de la superficie. Se pueden encontrar las siguientes categorías de defectos:

1. Escala atómica: líneas de dislocación, puntos de discontinuidad (por fallos en la red cristalina).
2. Características submicrónicas: Defectos en el pulido del material, poros debidos a densidades menores que la teórica del cuerpo.
3. Escala micrónica: límites de los cristalitos en los materiales policristalinos, poros, defectos en el molido del material.
4. Macrodefectos: Alabeo de la superficie, partículas fundidad.

#### 67.4.3 LIMPIEZA DEL SUBSTRATO.

La limpieza de la superficie del sustrato ejerce una influencia decisiva en la adhesión y crecimiento de la película sobre él. Una limpieza perfecta del sustrato es un prerrequisito para la preparación de películas con las debidas garantías de reproductibilidad.

La elección de la técnica de limpiado depende de la naturaleza del sustrato, del tipo de contaminantes y del grado de limpieza requerido. Los contaminantes más frecuentemente encontrados son residuos procedente de la fabricación, empaquetado, marcas de dedos, aceite y polvo.

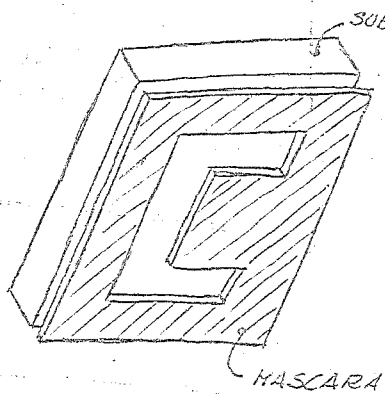
Se han desarrollado varios métodos de prueba de la limpieza de la superficie, algunos basados en la medida del grado de humedad del sustrato sobre el que se deposita una fina película de agua, bien por pulverización o bien por inmersión en un recipiente, de tal forma que la presencia de impurezas hidrofóbicas rompe esa película continua. Si las impurezas no son hidrofóbicas se pueden determinar uniendo el ángulo de contacto entre las gotitas de agua y la superficie, que será de 0º si la superficie está mojada y de 180º si hay impurezas que obliguen a tomar una forma esférica al agua. Otros se basan en la iluminación con luz ultravioleta.

El proceso de limpieza del sustrato requiere que se rompan las uniones entre las moléculas del contaminante y entre el contaminante y la superficie. Esto se puede realizar por procedimientos químicos tales como disolventes tales como soluciones acuosas de ácidos y alcalis o disolventes orgánicos como alcohol y cetonas. También se puede realizar suministrando energía suficiente para vaporizar la impureza por ejemplo por calentamiento o por bombardeo con partículas de alta energía, introduciendo el sustrato en una descarga luminosa.

67.5 FABRICACION DE PATRONES.

La producción de componentes eléctricos y circuitos de película fina requiere la generación de patrones geométricos sobre la misma. La tendencia hacia circuitos integrados cada vez más complejos y pequeños obliga a aumentar enormemente la precisión y resolución de los patrones.

La mayor parte de los métodos más comunmente usados caen en dos categorías. La primera cuenta con una barrera física de la forma apropiada en completo contacto con el sustrato durante el proceso de deposición de la película;



de tal forma que intercepta el chorro evaporante en algunas zonas y evita la condensación del material resistivo sobre ese área. La barrera utilizada recibe el nombre de "máscara de evaporación". La segunda categoría comprende las técnicas de formación de patrón después de la deposición de la película, por medio del levantamiento de ésta

en las zonas en que no se requiere, esto se realiza con la ayuda de barnices orgánicos que protegen la película en la configuración deseada, mientras que la parte no cubierta es eliminada. Estos métodos se conocen con el nombre de "grabado del sustrato" y se realizan mediante técnicas fotográficas tales como la fotografía.

Las máscaras a su vez se pueden fabricar por procedimientos mecánicos o por grabado similar al empleado en circuitos impresos.

## 68. PROPIEDADES DE LAS CAPAS DELGADAS.

### 68.1 PROPIEDADES MECANICAS.

Las propiedades mecánicas de las películas son bastante diferentes de las del material que las compone considerado en bloque; por ejemplo la dureza de algunas películas llega a ser 200 veces mayor que la de las muestras volumétricas analizadas, e incluso llega a ser varias veces la del material trabajado en frío.

Para determinar las propiedades mecánicas de las películas es necesario establecer una correlación entre el comportamiento observado y la estructura de las mismas. En el caso de las propiedades de adherencia, estas vendrán determinadas por los primeros pasos de su crecimiento, por ello es importante un estudio de su proceso de nucleación. Otras propiedades mecánicas dependen principalmente del crecimiento en sí y del tipo cristalográfico resultante (por ejemplo: amorfo, policristalino, un solo cristal, fibras orientadas, etc.). Tanto uno como otro: nucleación inicial y tipo cristalográfico dependerán del método de preparación utilizado.

#### 68.1.1 ADHERENCIA.

La duración del recubrimiento es de gran importancia en muchos campos y uno de los principales factores que gobiernan la duración es la adherencia. Especialmente cuando la película o el sustrato está sujeto a corrosión o a atmósfera húmeda, circunstancia bajo la cual aumenta la tendencia de la película a separarse del sustrato.

##### MÉTODOS DE MEDIDA:

Una técnica muy simple pero efectiva, de comprobar el grado de adherencia del par película-sustrato, consiste en pegar una cinta adhesiva a la superficie de la película, al tirar de ella la película puede ser levantada total o parcialmente o permanecer sobre el sustrato. Este método es solo cualitativo y no da ninguna indicación de la magnitud de las fuerzas de adherencia si estas son superiores a la adherencia entre cinta y película; es decir solo se pueden hacer dos clasificaciones: uniones débiles y uniones fuertes.

Hay otros métodos de tipo mecánico como el del rayado que consiste en una punta de acero al cromo suavemente redondeada a la que se hace deslizarse por la superficie, con una carga verticalmente aplicada que se va aumentando gradualmente, hasta un valor crítico en que la película está completamente rayada llegando al sustrato, forma un canal que se observa al microscopio. La carga crítica es una medida de la adherencia.

También se han empleado técnicas de medida por medio de ultracentrifugado y ultrasonidos.

Otros métodos están basados en la nucleación. A escala atómica el levantamiento de la película viene motivado por la rotura de los enlaces entre los átomos de la película y del sustrato de tal forma que la adherencia macroscópica puede ser considerada como la suma de las fuerzas atómicas moleculares. La energía de adsorción de un átomo simple es el término que ayuda a gobernar el comportamiento de los átomos que se condensan en la superficie; controla el tiempo de vida antes de la llegada del átomo y de esta manera también la nucleación. Por ello las observaciones al microscopio de las primeras etapas del crecimiento permiten establecer medidas de las cuales se determina la energía de adsorción del átomo en la nucleación.

### NATURALEZA DE LAS FUERZAS DE ADHERENCIA:

La energía de adherencia entre la película y el sustrato puede variar desde decenas de electrón voltio hasta 10 eV o más. Experimentalmente es difícil medir valores altos de la adherencia por los métodos de nucleación; cinta adhesiva, etc., pero se ha conseguido hacer medidas comparativas por medio de las técnicas de rayado.

Para valores bajos de adherencia ( $< 0,4$  eV), los átomos adsorbidos mantienen sus cortezas intactas y las fuerzas que los unen a la superficie son del tipo las de Van der Waals, recibe el nombre de "fisisorción". Para valores mayores ( $\geq 0,4$  eV) pueden existir electrones repartidos de los que participan película y sustrato, recibe el nombre de "quimisorción".

#### 68.1.2 ESFUERZOS MECANICOS SOBRE EL MATERIAL.

Las tensiones a que está sometida la película pueden ser de compresión y de tracción; en el primer caso la película tiende a extenderse paralelamente a la superficie, de tal forma que en casos extremos se abomba sobre el sustrato, en el segundo tiende a contraerse, - ahora en casos extremos las fuerzas son bastante altas para superar el límite elástico y la película se rompe.

Cuando los coeficientes de dilatación térmica de la película y el sustrato no son iguales, las variaciones de temperatura darán lugar a esfuerzos adicionales que tenderán a deformar el conjunto, se conoce esta contribución con el nombre de "tensión térmica".

Existe aún un tercer motivo de tensión que es la residual interna y recibe el nombre de "tensión intrínseca".

De esta forma la presión total  $\sigma$ , es la suma de las tres anteriores:

$$\sigma = \sigma_{\text{externa}} + \sigma_{\text{termica}} + \sigma_{\text{intrínseca}}$$

que para aplicaciones técnicas debe de ser pequeña; de entre todas ellas en muchos sistemas la que predomina es la intrínseca.

### TECNICAS DE MEDIDA DE LA TENSION.

Los esfuerzos que ejercen las películas sobre los sustratos finos dan lugar a una curvatura del mismo, cuyo grado se puede medir. El esfuerzo de compresión curvará la superficie de la película hasta dejarla convexa, mientras que la de tracción tiende a dejarla cóncava; en ello se basan los métodos de medidas mas usuales, en los que se mide el radio de curvatura, o la deflexión del extremo final libre.

Otros métodos de medidas son por rayos X o por técnicas de difracción de los electrones.

#### 68.1.3 DUCTILIDAD.

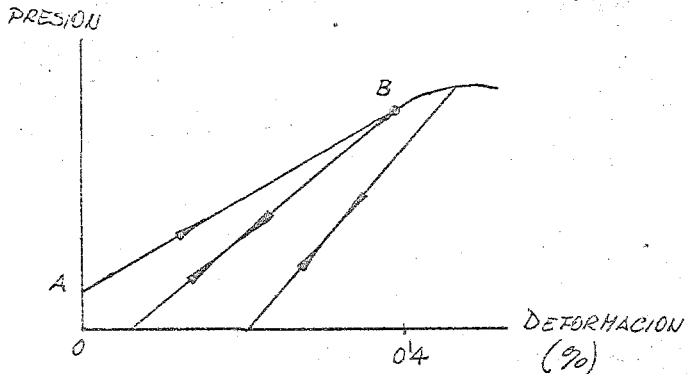
La propiedad más importante que se encuentra al observar estas, es que las películas son más fuertes que el material volumétrico.

### METODOS DE MEDIDA.

Se han desarrollado aparatos para la medida de los alargamientos producidos por pequeñas cargas, mediante métodos interferométricos o con un microscopio. También se pueden usar las técnicas de difracción de electrones y rayos X.

## COMPONENTES ELASTICOS.

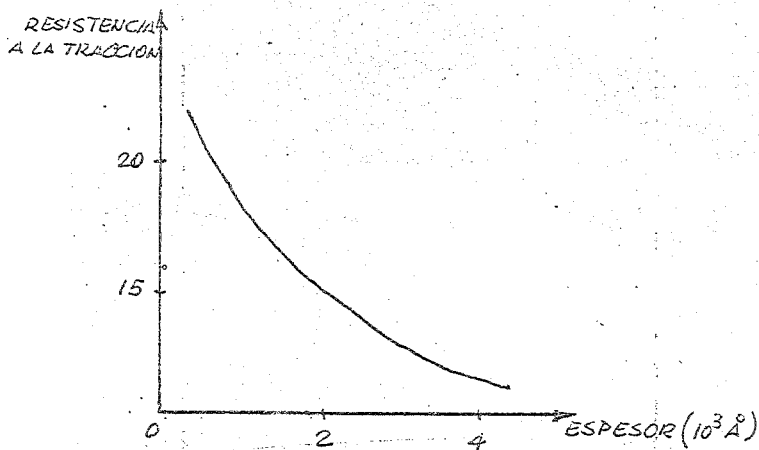
Una curva típica de presión - deformación, nos permite ver que la deformación inicial (AB) ha alterado la película de forma permanente.



Cuando el ensanchamiento de la película ha superado su límite elástico tendrá lugar una deformación plástica. En general parece que las propiedades elásticas de las películas son similares a las de material volumétrico.

## RESISTENCIA.

Se observa un gran incremento de la fortaleza de la película al determinar su espesor. Se ha pensado que ello se puede deber a sus superficies relativamente perfectas, puesto que la energía para formar una dislocación en una superficie perfecta es alta, luego esto no ocurre fácilmente.



Experimentalmente se ha comprobado que los efectos del tamaño del grano no son importantes puesto que es pequeña la diferencia entre películas policristalinas y de cristales simples.

La estructura de la película policristalina es más desordenada que la conseguida por el trabajo en frío del material, con lo cual aumenta su fortaleza.

La presión en la película se considera con una cantidad compuesta formada por:

$$\sigma_{\text{película}} = \sigma_{\text{volumétrica}} + \sigma_{\text{imperfección}} + \sigma_{\text{espesor}}$$

y se puede obtener:  $\sigma_{\text{película}} = \sigma_{\text{volumétrica}} \left(1 + \frac{K}{d}\right)$

para  $K = \text{cte}$  y  $d = \text{espesor de la película}$ .

## FRACTURA.

A muy altas tensiones la película se romperá. El mecanismo de la fractura consiste en una deformación plástica localizada que da una resultante en la película; esto produce una elevación del nivel de presión y aparecen pequeñas roturas que todas unidas producen el fallo de la película. Las dislocaciones responsables de este comportamiento no son las crecidas dentro de la película sino las que aparecen en las regiones sometidas a tensiones fuertes.



68.2 PROPIEDADES ELECTRICAS.

68.2.1 FUENTES DE RESISTIVIDAD EN CONDUCTORES METALICOS.

De acuerdo con la moderna teoría cuántica electrónica, la conducción eléctrica en los metales se debe a los electrones, mientras que la resistividad eléctrica proviene de la dispersión de estos electrones por la red cristalina. Puesto que los electrones pueden pasar en su movimiento natural, a través de una red perfecta sin ninguna atenuación (con lo cual la medida de la resistividad indica la desviación de una estructura metálica de su regularidad perfecta). En la realidad no existe ninguna estructura perfecta. Los electrones siempre sufren alguna dispersión cuando se mueven en un sólido, la distancia media que pueden desplazarse entre colisiones recibe el nombre de "recorrido libre medio".

La resistencia eléctrica de los metales proviene una gran variedad de causas tales como la temperatura, las impurezas y los huecos en la estructura.

68.2.1.1 TEMPERATURA.

Aún las mallas que no tienen defectos estructurales o átomos extraños, no pueden ser completamente regulares a ninguna temperatura, puesto que los átomos no permanecen estacionarios, sino que están en vibración alrededor de una posición media. Considerando las interacciones entre los electrones y los modos de vibración de la red (fonones), es conveniente hacer uso de la temperatura de Debye. En la teoría de Debye de las temperaturas específicas, se cree que un cristal tiene un ancho espectro de modos vibratorios, con un límite superior fijo; esto se debe a que la longitud de onda mínima del fonón es del orden del espacio interatómico, luego la temperatura de Debye  $\Theta$  se define por

$$\Theta = \frac{h \nu_{\text{máx}}}{K} \quad (K = \text{cte de Boltzmann})$$

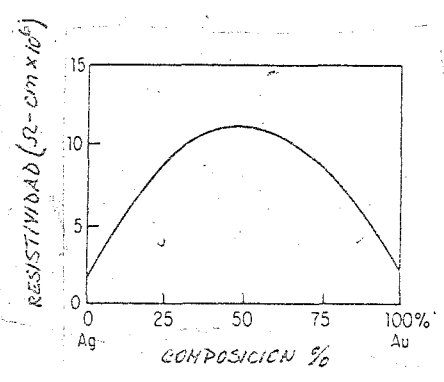
Para temperaturas bajas ( $T \ll \Theta$ ) la resistividad varía según  $T^n$  ( $n \approx 5$ ) y para las altas ( $T \gg \Theta$ ) varía linealmente con T. En muchos metales este valor de  $\Theta$  es inferior a las temperaturas normales, con lo cual a temperaturas superiores a 250C esta variación es lineal.

68.2.1.2 DEFECTOS PUNTUALES.

Un átomo de una impureza dentro de un metal, en general, transportará una carga eléctrica efectiva diferente de la del metal, por lo que constituye una fuente de dispersión de electrones.

Aunque el metal y la impureza tuviesen la misma valencia, la carga efectiva será ligeramente diferente. De esta forma la resistividad se eleva con el incremento de la concentración de impureza, alcanzando un máximo para una composición de aproximadamente el 50% de impureza.

Cuando se trata de impurezas de valencia diferente a la del metal el efecto es considerablemente mayor.



Así en los materiales considerados volumétricamente, la resistividad se incrementa con las impurezas, y en el caso de películas finas, debido a que en el proceso de deposición se captan muchas más impurezas, la resistividad viene multiplicada por varios cientos o más.

#### 68.2.1.3 IMPERFECCIONES ESTRUCTURALES.

Un sólido en equilibrio a la temperatura absoluta  $T$  tiene una concentración de imperfecciones (huecos, intersticios y dislocaciones) del orden de

$$e^{-W/KT}$$

donde  $W$  es la energía de activación para la formación de las imperfecciones. Lo cual corresponde a menos de  $10^{-4}\%$  a la temperatura ambiente normal para un  $W$  de cerca de  $1\text{eV}$ .

#### 68.2.1.4 REGLA DE MATTHIENSSEN.

La regla de Matthiessen establece que la resistividad de una muestra dada es la suma aritmética de las contribuciones individuales hechas por todas las fuentes de resistencia separadas.

Generalmente todas las contribuciones se agrupan en la de temperatura y otra llamada resistividad residual

$$\rho = \rho_{\text{temp.}} + \rho_{\text{residual}}$$

Como el coeficiente de temperatura de la resistencia es:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d \text{ temp}}{dT} \quad \text{será} \quad \alpha\rho = \frac{d \text{ temp}}{dT} = \text{cte.}$$

que se conoce también como regla de Matthiessen y permite ser usada cuando es más fácil de medir el coeficiente de temperatura que la resistividad.

#### 68.2.2 INFLUENCIA DEL ESPESOR EN LA RESISTIVIDAD.

Ya se vió anteriormente que las variaciones en la resistividad del material corresponde a cambios en el recorrido libre medio de los electrones. Puesto que un electrón sufrirá una reflexión de algún tipo en la superficie, la resistividad aumenta siempre que la muestra sea lo bastante fina para que las colisiones con la superficie llegue a ser una fracción significativa del número total de colisiones, en otras palabras, siempre que una o más dimensiones de la muestra sean comparables al recorrido libre medio.

##### 68.2.2.1 TEORIA DE SONDHEIMER.

Como hemos visto en el caso de capas delgadas el recorrido libre medio de los electrones viene limitado, además de por dispersión de los fonones, impurezas y defectos como en el caso del metal en bloque, por el espesor de la película.

Se produce, en efecto, interacciones de los electrones con las superficies, produciéndose reflexiones que pueden ser especulares, difusas o una combinación de las dos. De acuerdo con los experimentos realizados se han considerado estas en su mayor parte difusas.

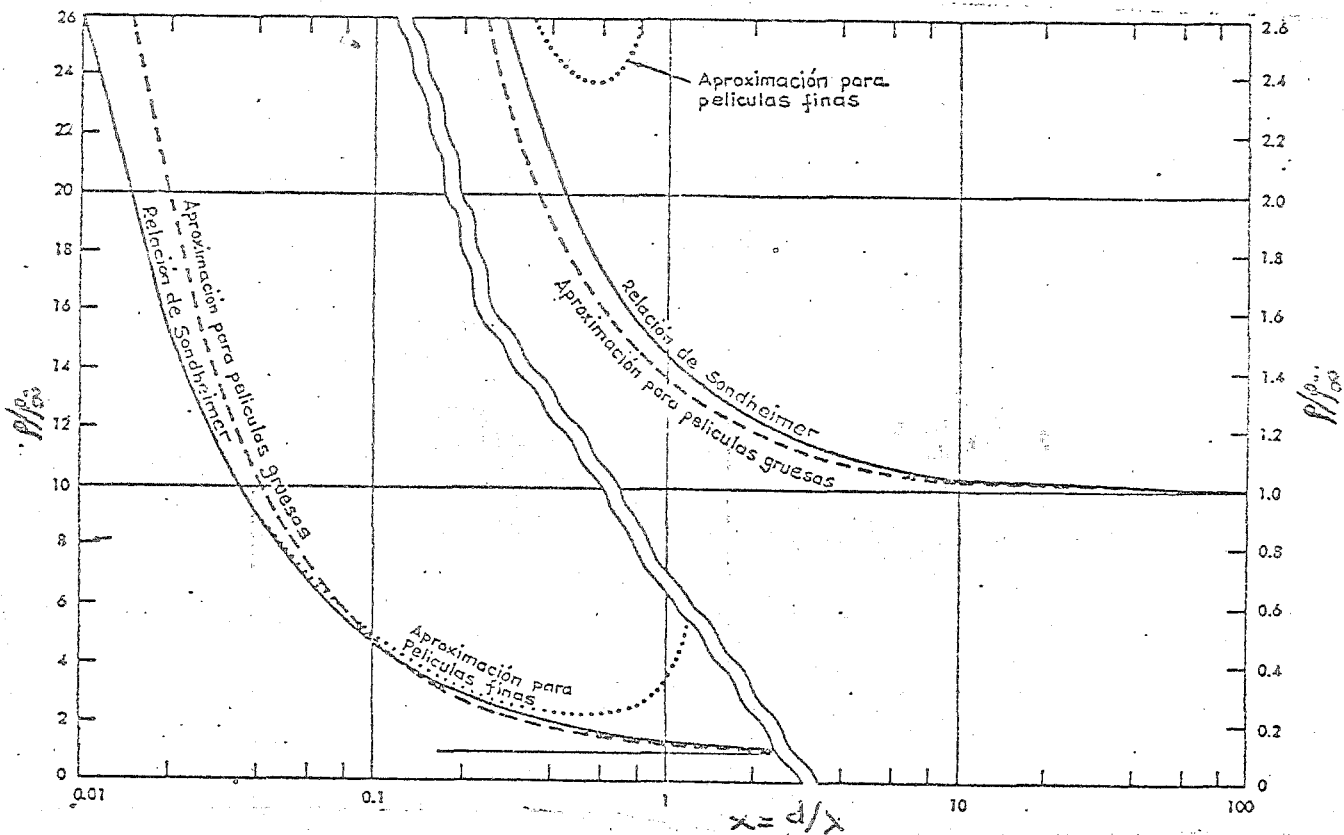
Partiendo de ello Sondheimer ha desarrollado una teoría que explica esta dispersión, partiendo para ello de un electrón y un punto arbitrario en la película, consideró todas las posibles direcciones de la velocidad, llegando así a obtener una relación entre la resistividad y el espesor

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left[ 1 - \frac{3}{2x} \int_1^{\infty} \left( \frac{1}{t^3} - \frac{1}{t^5} \right) (1 - e^{-Kt}) dt \right]$$

donde  $x = \frac{d}{\lambda}$  y  $t = \frac{1}{\cos \theta}$

para  $\theta$  = temperatura de Debye  
 $\rho$  = resistividad  
 $\rho_0$  = resistividad del material en bloque.  
 $d$  = espesor de la película.  
 $\lambda$  = recorrido libre medio.

Esta relación se muestra en la figura.



Aproximando esta expresión para espesores grandes y pequeños (curvas a trazos de rayas y de puntos, respectivamente en la figura) se tiene:

Para películas gruesas (entendiendo como película gruesa aquella de mayor espesor que  $\lambda$  y ésta puede ser de unos pocos Å):

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{3}{8x} \quad (\text{para } x > 0,1)$$

Para películas finas:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{4}{3x} \frac{1}{\ln \frac{1}{x} + 0,423} \quad (\text{para } x < 0,1)$$

Según se puede observar en la figura, la aproximación para películas gruesas corta a la curva exacta en  $x = 0,1$  y por encima de  $d = 0,08\lambda$  la aproximación para películas gruesas es mejor que la película fina. Por ello la mayor parte de los datos para confirmar la relación de Sondheimer se tomaron para películas de la región de validez de la aproximación de películas gruesas.

El espesor afecta a la resistividad, de la misma forma que si se tuviera un acortamiento en el recorrido libre medio - igual a

$$\lambda \frac{8x}{3} = \frac{8d}{3}$$

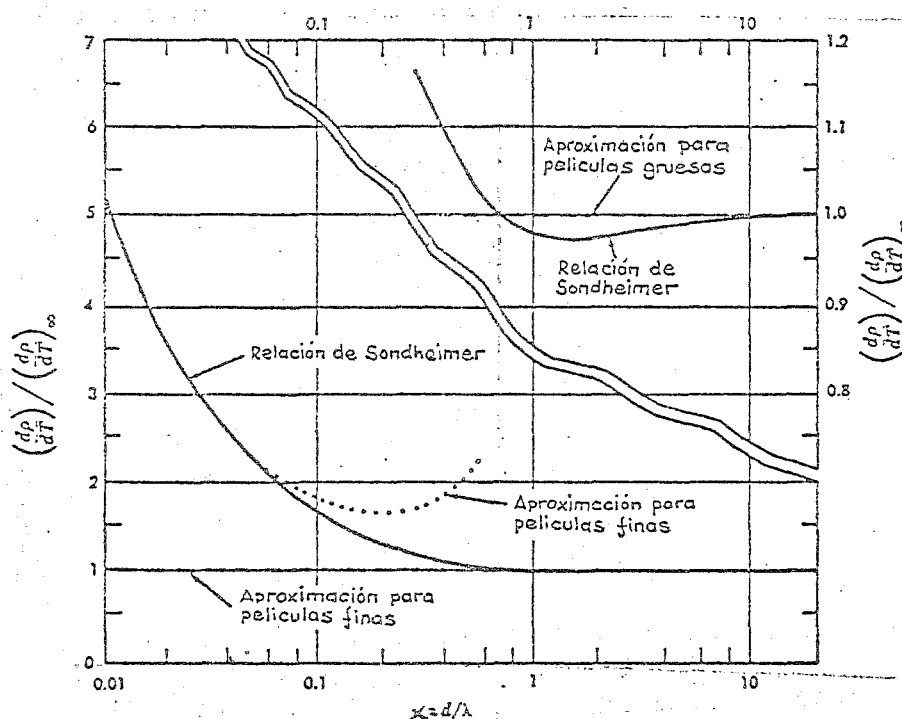
debido a las colisiones con las superficies del conductor.

#### 68.2.2.2 EFECTO DEL ESPESOR SOBRE EL COEFICIENTE DE TEMPERATURA.

Se puede aplicar un razonamiento similar para determinar el efecto del espesor de la película sobre el coeficiente de temperatura de la resistencia.

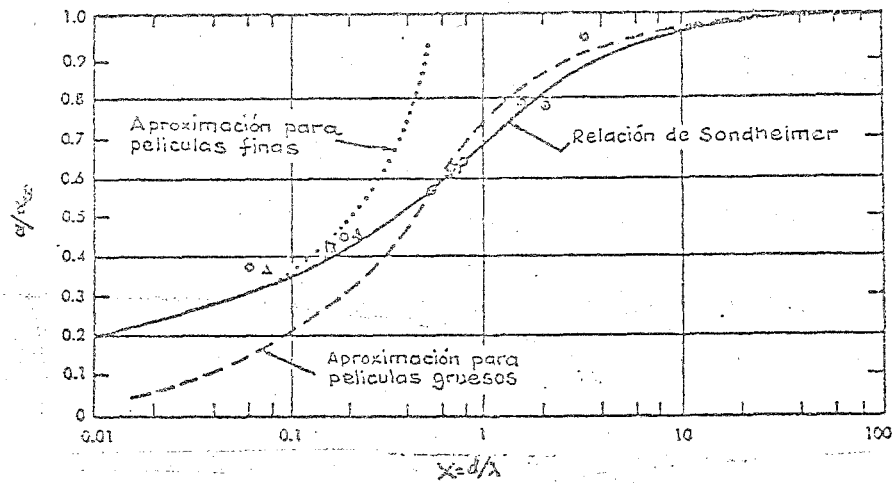
Diferenciando en la expresión de Sondheimer,  $\rho$  respecto de la temperatura, se comprueba que  $d\rho/dT$  crece cuando disminuye el espesor.

En la figura se muestra la dependencia entre el espesor y



$\frac{d}{dT}$ , donde se ve que la curva presenta un mínimo para 0,98 donde  $x = 1,5$ . A puntos se puede apreciar la aproximación para películas finas y a rayas la de películas gruesas.

El coeficiente de temperatura  $\alpha$  es, por tanto, función del espesor y se muestra en la figura



La aproximación para películas gruesas es: (en trozos discontinuos)

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{1}{1 + \frac{3}{8x}} \quad (x > 0,1)$$

y para películas finas es: (a puntos)

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{3x}{4} \left( \ln \frac{1}{x} + 0,423 \right) \quad (x < 0,1)$$

La variación de la resistencia con la temperatura, se ha reducido considerablemente con la aparición de películas metálicas de aleaciones que presentan un coeficiente de temperatura muy pequeño, debido a su técnica y composición metálica controlada.

### 68.2.3 COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE LA RESISTENCIA NEGATIVO.

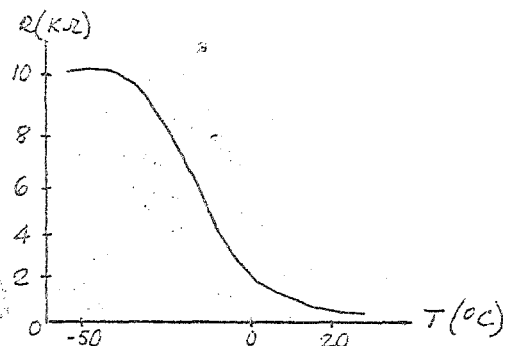
Las películas están constituidas por pequeñas islas que pueden estar conectadas físicamente entre si o no estado. En el caso de que las islas estuviesen interconectadas entre si y tuviesen individualmente una resistividad similar a la del material en bloque, darían en conjunto una resistividad elevada y el coeficiente de temperatura sería muy próximo al del material volumétrico. En la práctica, sin embargo, el valor del coeficiente de temperatura difiere mucho e incluso en la mayoría de los casos es negativo.

En la figura se muestra la curva resistencia temperatura de una película metálica discontinua.

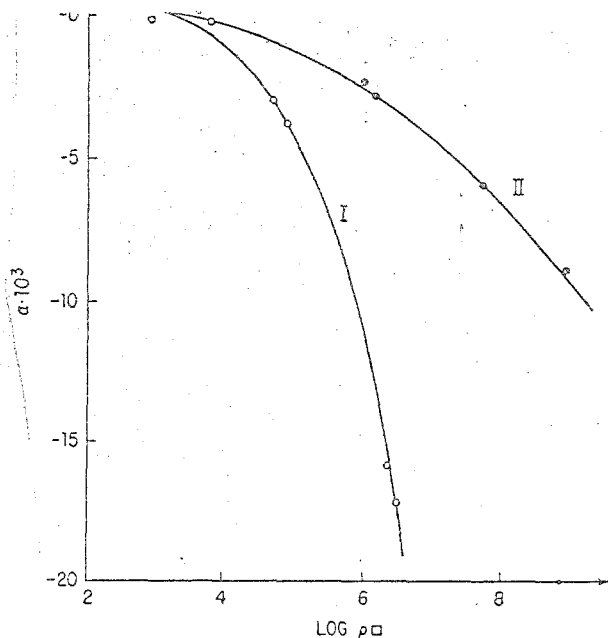
Estos resultados se pueden aproximar por la ecuación

$$R = A \cdot T^{-B} \cdot e^{\frac{C}{KT}}$$

donde A, B y C son constantes para cada película particular.



De la misma forma se ha encontrado un rápido decrecimiento del coeficiente de temperatura de la resistencia con el aumento de la resistividad, es decir al disminuir el espesor de la película.

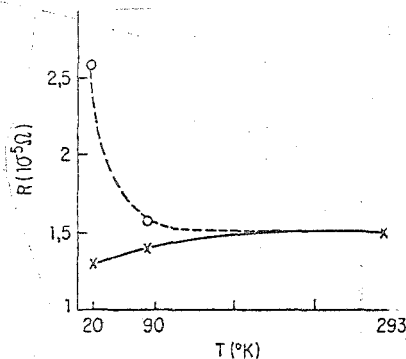


#### 68.2.4 CARACTERISTICAS EN ALTA FRECUENCIA.

Se ha visto que el coeficiente de temperatura negativo se debe a la falta de continuidad eléctrica entre los granos o islas del material. En películas muy finas estos granos están separados por espacios de aire, mientras que en las más gruesas el espacio está relleno por material dieléctrico. En todos los casos el coeficiente de temperatura se eleva a causa de la energía de activación debida a las transiciones de electrones de un grano a otro.

Una estructura de este tipo en la que los granos están separados por pequeños espacios, es electricamente equivalente a series de condensadores, por lo que su impedancia en corriente alterna es menor que en corriente continua. Además esta diferencia entre las conductancias en corriente alterna y continua, se hace progresivamente mayor al decrecer la temperatura (puesto que la resistencia de la película discontinua aumenta).

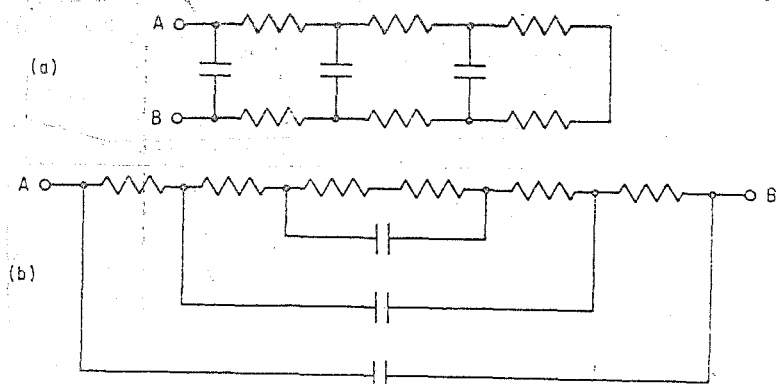
En la figura se puede observar que en corriente continua la película presenta un coeficiente de temperatura próximo a cero, a la temperatura ambiente (20°C), pero se hace muy negativo a temperaturas bajas. Sin embargo en corriente alterna a 1 MHz los espacios entre granos están cortocircuitados por la corriente y presenta un coeficiente de temperatura positivo. Notese que a temperaturas altas la corriente directa entre los granos es bastante grande y no hay diferencias entre los valores de resistencia en c.c. y c.a.



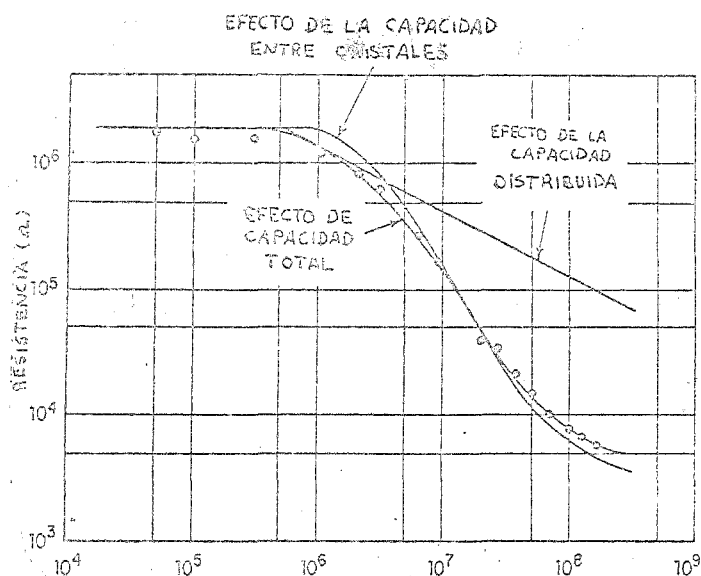
Haciendo medidas en alta frecuencia se ha encontrado una disminución de la resistencia de las películas, situación que se atribuye a un efecto geométrico que no tiene nada que ver con la microestructura de la película y que se debe a un acoplamiento capacitivo entre las dos unidades de la película.

Esto se puede representar por una película inicialmente doblada sobre si misma, como se muestra esquemáticamente en la figura, de tal forma que una vez abierta da el esquema siguiente.

Se puede ver el efecto de la caída de la resistencia con la frecuencia en la curva siguiente tomada a 25°C, donde

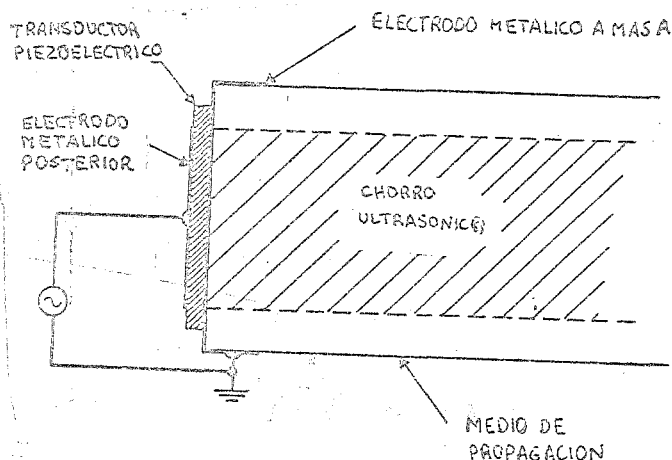


se aprecia que en bajas frecuencias determinan el efecto de la capacidad distribuida, mientras que en altas frecuencias el factor predominante es la capacidad entre cristallitos.



### 68.3 PROPIEDADES PIEZOELECTRICAS.

Surgieron las películas finas piezoeléctricas ante la necesidad de ampliación de la banda de bajas pérdidas en transductores electromecánicos para frecuencias muy elevadas. La estructura de los transductores piezoeléctricos normalmente utilizados para la generación o detección de ondas ultrasónicas en sólidos es la de la figura. El modo de vibración del transductor viene determinado por su orientación cristalográfica, su geometría y la dirección del campo aplicado, mientras que la frecuencia de trabajo viene determinada por el espesor del transductor. Cuando este es aproximadamente igual a la mitad de la longitud de onda de la onda mecánica en el material transductor se obtienen las más bajas pérdidas de inserción y las más amplias anchuras de banda. Por tanto a menor espesor mayor frecuencia.



En bajas frecuencias (por debajo de 100 MHz) el transductor se puede fabricar fácilmente con un material piezoeléctrico convenientemente aislado, por ejemplo un cristal de cuarzo adecuadamente unido al medio de propagación. Para frecuencias superiores a 100 MHz (correspondiente a espesores de los transductores inferiores a 20 micras), aparecen grandes dificultades prácticas en la fabricación del transductor y en su unión al medio de propagación.

Con objeto de superar estas deficiencias se introdujeron las películas finas piezoeléctricas, que por deposición al vacío se pueden obtener en espesores de micrones sobre gran variedad de substratos; obteniéndose con películas bien orientadas y materiales piezoeléctricos de alta resistividad, transductores para frecuencias de gigaherzios.

#### 68.3.1 ACOPLAMIENTO PIEZOELECTRICO EN CRISTALES CUBICOS Y HEXAGONALES.

El coeficiente  $K$  de acoplamiento electromecánico es un parámetro esencial del material para el cálculo de las características electromecánicas del transductor piezoeléctrico. Para el trabajo de las películas finas piezoeléctricas se pueden definir los factores de acoplamiento en términos de las constantes piezoeléctrica, dieléctrica y elástica.

La elección correcta de estas constantes depende del modo de vibración y de la estructura cristalográfica y orientación del transductor.

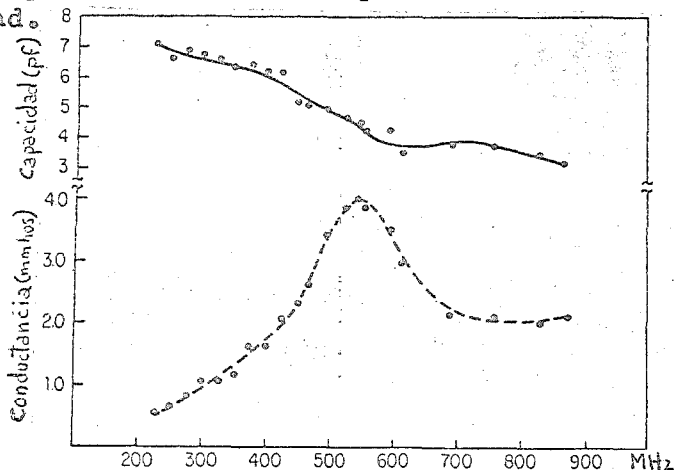
### 68.3.2 ACOPLAMIENTO PIEZOELECTRICO EN PELICULAS FINAS.

Las películas producidas por evaporación al vacío están formadas por muchos cristales con diferentes grados de desorientación entre sí, por lo que es necesario considerar que efectos tendrá esta estructura policristalina sobre el acoplamiento piezoeléctrico. Cada cristal se comportará individualmente como los cristales vistos antes, si todos ellos tienen la misma orientación, actúan en fase y el resultado general es el de un solo cristal. Cuando existen pequeñas dispersiones angulares en la orientación de los cristales, no se alcanza la generación de onda requerida a causa de la cancelación de efectos entre cristales alineados en oposición, sino que da lugar a una reducción en el acoplamiento. Cuando el tipo de desorientación es mayor, con cristales cuyos ejes polares se encuentran en oposición, da lugar a desplazamientos mecánicos fuera de fase que hacen decrecer el acoplamiento, llegando a hacerse este nulo en una película con áreas aproximadamente iguales de cada polaridad. De todo ello se desprende que influye mucho en las propiedades piezoeléctricas, el método empleado en la deposición de la película.

### 68.3.3 PROPIEDADES ELECTRICAS.

Las propiedades eléctricas de los transductores piezoeléctricos vienen normalmente determinadas por dos características:

- 1) La admitancia en función de la frecuencia, representada generalmente por la combinación paralelo de una resistencia y una capacidad.



En la figura tenemos una curva típica de admitancia, que muestra que a la frecuencia fundamental (500 MHz) la conductancia pasa por un máximo y la capacitancia decrece.

- 2) Las características de transducción, representadas por las pérdidas de inserción eléctrica en función de la frecuencia. Estas son función del factor de acoplamiento piezoeléctrico del transductor.

### 68.4 PROPIEDADES FERROMAGNETICAS.

Recientemente se han incrementado las investigaciones de las propiedades ferromagnéticas de las películas finas, por su gran aplicación en componentes magnéticos, especialmente en la tecnología del almacenamiento y recuperación de la información. La mayor



parte de la investigación se ha dirigido hacia las películas metálicas planas de metales ferromagnéticos, tales como el hierro, cobalto y níquel, habiéndose hecho extensivo, posteriormente a otros materiales no magnéticos. Dentro de ellos el mayor énfasis se ha puesto en la aleación de níquel y hierro conocida con el nombre de Permalloy, debido a que estas películas son apropiadas para elementos biestables en memorias de computadoras digitales; aunque los resultados de estos trabajos son extensibles a todas las películas ferromagnéticas.

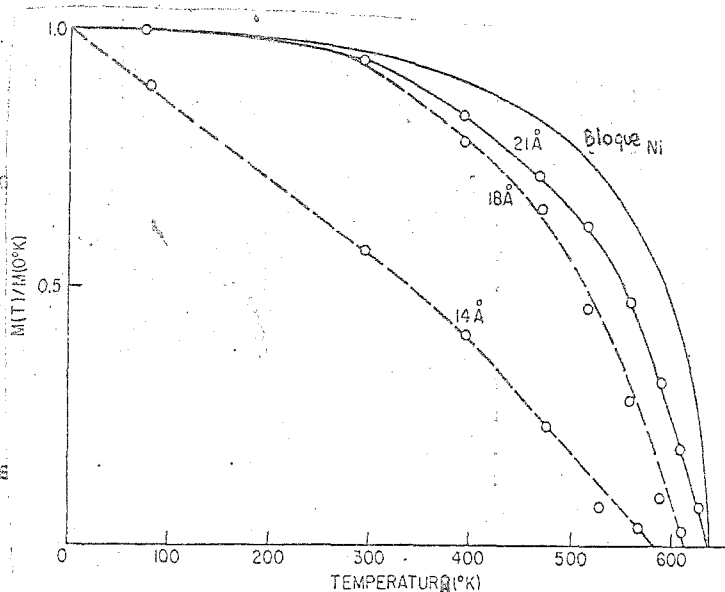
Desde el punto de vista de ferromagnetismo, las películas ferromagnéticas pueden fabricarse con las siguientes propiedades que son poco corrientes pero tecnológicamente deseables:

- 1) La magnetización  $M$  tiende a permanecer en el plano de la película debido a la anisotropía de la configuración de la película.
- 2) Tiene una dirección preferente, conocida como eje fácil, - de tal forma que en el estado de más baja energía la magnetización  $M$  se distribuye a lo largo de este eje en otro sentido (anisotropía uniaxial).
- 3) El sentido de la magnetización  $M$  puede ser invertido por aplicación de un campo magnético pequeño.

#### 68.4.1 DEPENDENCIA ENTRE EL ESPESOR Y LA MAGNETIZACION.

Esta dependencia representa un aspecto fundamental en la comparación de los fenómenos ferromagnéticos de los materiales volumétricos y de las películas finas. El movimiento de un átomo en la superficie de una película ferromagnética uniformemente magnetizada, está menos obligado hacia la dirección media de la magnetización  $M$ , que en el interior del material, debido a que los enlaces de los cambios cuanto - mecánicos están ausentes en el lado exterior de la superficie. De esta forma cuando disminuye el espesor, aumenta la proporción de átomos de superficie respecto de los del interior, las fuerzas de alineación que causan el ferromagnetismo disminuyen gradualmente.

Posteriormente teorías han establecido un espesor umbral por debajo del cual es cuando comienza a disminuir la magnetización  $M$ . Experimentalmente se ha comprobado un rápido decrecimiento de  $M$  con la disminución del espesor de la película, por debajo de espesores umbrales umbrales de 150 Å, los cuales fueron interpretados para adaptarse a la teoría. Sin embargo más recientemente se han realizado las medidas directamente en el sistema de vacío donde se hace la deposición y con campos elevados obteniéndose umbrales mucho más pequeños, por ejemplo en la figura se observa que las películas de níquel para espesores superiores a 20 Å. Se comportan esencialmente como el material en bloque. Para películas de hierro se ha encontrado  $d=30$  Å. Estos valores están totalmente de acuerdo con la teoría. La diferencia entre las primeras y segundas medidas se explica por dos motivos:



- 1) Las primeras fueron depositadas a una presión más alta y las condiciones de medidas fueron tales que se produjo oxidación.
- 2) En las medidas de las primeras no se suturaron magnéticamente por completo.

#### 68.4.2 RESONANCIA.

En las películas ferromagnéticas se experimentan dos tipos de resonancia:

- 1) Resonancia ferromagnética, en la cual la magnetización se mueve a lo largo de la película.

Todavía no ha sido posible estudiar este fenómeno del movimiento que tiene lugar cuando el material ferromagnético se encuentra bajo los efectos de un campo de radiofrecuencia en presencia de un campo magnético de corriente continua.

Para ciertos valores de la frecuencia y del campo, el sistema se encuentra en resonancia.

Se ha observado esta resonancia en películas ferromagnéticas en gamas de frecuencia desde 10 KHZ hasta 70 GHZ.

- 2) Resonancia de onda de espín, en la cual las distribuciones de la magnetización no son homogéneas.

El ferromagnetismo es un fenómeno que tiene su origen en las alineaciones de los espines (son sus momentos magnéticos asociados) dentro de un cuerpo sólido; cuando hay desviaciones de la alineación completa, estas se representan por ondas - con intervalos periódicos inversos de los spines. La teoría de estas ondas se desarrolló inicialmente para explicar la dependencia de la magnetización con la temperatura; pero posteriormente se comprobó que podían ser excitadas hasta la resonancia por campos de radiofrecuencia.

## 69. COMPONENTES DE PELICULA FINA.

### 69.1 RESISTORES.

Las películas finas utilizadas para la fabricación de resistencias discretas, representan una importante mejora en cuanto a características y fiabilidad respecto a las del tipo de composición, así como un coste más pequeño que las resistencias de precisión bobinadas con características comparables. Pero es en el área de los circuitos integrados donde son más utilizadas, para conseguir resistencias de precisión con dimensiones del orden de una décima de milímetro (0,1 mm.).

#### 69.1.1 ELECCIONES DE LOS MATERIALES.

##### 69.1.1.1 REQUISITOS DE LOS RESISTORES DE PELICULA.

La mayor parte de los requisitos de los resistores de película pueden encontrarse en películas con resistencia de hoja  $R_s$  en la gama de 10 a 1.000  $\Omega$ /cuadrado. Las inferiores a 10  $\Omega$  raramente son necesarias, mientras que los valores mas altos (hasta M $\Omega$ ) se pueden realizar aumentando la longitud del recorrido de la corriente por la resistencia; aunque existe la necesidad de películas de más de 1.000  $\Omega$ /cuadrado, problema actualmente en investigación.

Otro requisito exigible a estas resistencias es un coeficiente de temperatura de la resistencia bajo ( $\alpha$  menor que 100 ppm/°C). Al mismo tiempo deben de ser suficientemente estables para que no tenga lugar ningún cambio de valor, durante su funcionamiento, por debajo de un valor especificado.

Finalmente el proceso de fabricación debe ser tal que se alcancen las especificaciones a un coste razonable.

##### 69.1.1.2 FUENTES DE RESISTIVIDAD EN PELICULAS.

De lo anterior se comprueba que la resistividad de los materiales utilizados en películas finas se encuentra dentro de la gama de 100 a 2.000  $\Omega$ . cm. Sin embargo los metales en bloque no pueden tener resistividades que excedan en mucho al límite más bajo; pueden satisfacer este requisito fácilmente los semiconductores pero tienen por el contrario un gran coeficiente de temperatura negativo.

Afortunadamente muchos materiales cuando son depositados en forma de película, alcanzan resistividades significativamente más altas sin necesidad de aumentar su coeficiente de temperatura. Algunas de las formas en las que esto sucede son:

- 1) Dispersión de una cantidad significativa de electrones de conducción en la superficie de la película: Produciendo una resistividad alta y un coeficiente de temperatura bajo. Sin embargo este incremento de la resistividad es muy sensible a las variaciones del espesor de la película. Además estas películas son propensas a aglomerarse bastante fácilmente de tal forma que tienen una integridad mecánica muy limitada. En pocas ocasiones se utiliza este fenómeno como fuente de resistividad en películas finas.
- 2) Impurezas o imperfecciones del material en concentraciones superiores al equilibrio termodinámico: También así se obtiene un coeficiente de temperatura pequeño. Sin embargo son propensas a variaciones drásticas del equilibrio hasta precipitar, produciendo cambios en el valor de la resistencia; se evita este problema sometiendo la resistencia durante su proceso de fabricación a un tratamiento térmico de estabilización, o utilizando solamente materiales refractarios.

- 3) Sistemas de dos fases (metal-aislante o películas de compuesto cerámico-metálico): Consiste en "diluir" una película conductora por dispersión en una matriz aislante, de tal forma que su espesor físico es considerablemente mayor que el espesor eléctrico. Por ello es más robusta, pero presenta el problema del control de la composición, que si pierde puede dar lugar a un gran coeficiente de temperatura negativo y a mala estabilidad.
- 4) Películas porosas o de baja densidad: Son similares a las anteriores en que tienen un espesor físico considerablemente mayor que su espesor eléctrico. Presentan el problema de ser muy susceptibles de oxidación debido a su gran superficie. Convenientemente protegidas pueden tener una resistencia alta con un bajo coeficiente de temperatura y estabilidad adecuada.
- 5) Películas semicontinuas: Películas que se encuentran todavía en el estado de islas de crecimiento. La separación entre islas es tal que el coeficiente de temperatura positivo del metal de las islas se equilibra con el negativo debido a la transferencia de electrones entre islas. Son también susceptibles de oxidación y de aglomeración.
- 6) Películas estratificadas: Formadas por capas, una fina de coeficiente de temperatura positivo y baja resistividad y otra más gruesa con el coeficiente negativo y alta resistividad; la combinación de resistividad alta y bajo coeficiente. Se obtienen por gettering durante la deposición.
- 7) Estructuras cristalinas: Ciertos materiales como el  $\beta$ -tántalo, cuando se forman en películas finas, adquieren una estructura cristalina que no tienen en bloque; presentando alta resistividad y bajo coeficiente de temperatura.

## 69.1.2 AJUSTE DE LOS RESISTORES.

### 69.1.2.1 FACTORES DETERMINANTES DE LA PRECISION DE LOS RESISTORES.

1) Control de la resistencia de la lámina: Varios factores determinan el grado de control de la resistencia de la lámina que se puede alcanzar mediante algunos procesos. Existe una limitación esencial a superar, consiste en el grado para el cual las películas de espesor uniforme pueden ser depositadas sobre un área considerable. Según el método de deposición se han hallado soluciones para mejorar la uniformidad, pero encarecen la resistencia.

Además la resistencia puede variar para cada parte del área a otra, debido a diversos motivos como diferentes temperaturas del sustrato durante el proceso de deposición, también es importante la rugosidad que pueda presentar el sustrato.

El equipo para controlar la deposición es muy delicado, puesto que debe "ver" las mismas condiciones de temperatura, composición y proporción de deposición que el sustrato. Por otra parte se ha comprobado que la presencia de un campo eléctrico afecta al crecimiento de la película, por lo cual el campo de prueba no debe de ser aplicado hasta que tenga un espesor determinado.

Otro problema es la posibilidad de cortar automáticamente la deposición cuando se ha alcanzado el valor de resistencia deseado.

- 2) Dimensiones de la resistencia: Excepto para áreas relativamente grandes no se obtiene gran seguridad en la delineación de las formas de las resistencias por evaporación a través de máscaras debido a la separación máscara-substrato. Por ello y debido, además a que el proceso con máscaras no se puede utilizar en todos los métodos de deposición, se desarrolló la generación de patrones por litografía, obteniéndose unas tolerancias mucho más pequeñas, aunque conserva limitaciones bien definidas.

Este tipo de fenómenos dan lugar a errores aleatorios en las dimensiones del resistor final.

#### 69.1.2.2 AJUSTE DEL SUBSTRATO.

Cuando todos los resistores en un substrato dado tienen una composición uniforme, puede ser más rentable económicamente ajustar la resistencia de la lámina en el substrato completo. Se realiza después de que los resistores han sido fabricados, midiendo uno o más resistores del substrato durante el proceso de ajuste; generalmente este es un tratamiento térmico, un recocido o una oxidación que cambian el valor de la resistencia.

También se realiza con buenos resultados una reducción del espesor por medio de un ataque químico por pulverización en radiofrecuencia.

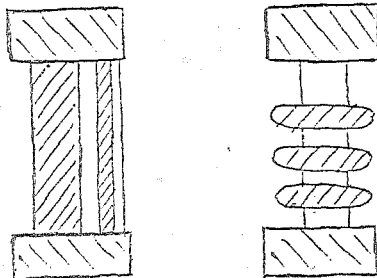
#### 69.1.2.3 AJUSTE DE RESISTORES INDIVIDUALES.

No siempre es posible un ajuste del substrato como el descrito anteriormente, bien debido a sus tolerancias limitadas por errores dimensionales o bien a que la resistencia de la lámina varía considerablemente de un resistor a otro aún en el mismo substrato.

Se recurre entonces a un ajuste de cada resistor.

- 1) Resistores discretos: El método más ampliamente usado es el de espiraleado, especialmente en formas cilíndricas, donde se corta una espiral del material, aumentándose la longitud del recorrido entre contactos. Durante el proceso se está midiendo simultáneamente la resistencia y se interrumpe automáticamente al alcanzar el valor deseado.
- 2) Cambio de geometría: La resistencia se construye inicialmente de un valor superior, para ser ajustada posteriormente.

En la figura vemos dos resistores, uno con varios brazos paralelos y otro constituido por porciones supuestas.



- 3) Ajuste del espesor por oxidación anódica: Este método está limitado a películas metálicas y consiste en reducir el espesor por medio del crecimiento un óxido anódico en la superficie. Tiene la ventaja de proporcionar una protección adicional generada como un producto del propio proceso.

### 69.1.3 DISEÑO DE RESISTORES DE PELÍCULA FINA.

#### 69.1.3.1 ELECCION DE LA FORMA DEL RESISTOR.

En primer lugar el valor de la resistencia de la lámina para un grupo de resistores sobre un mismo sustrato estará determinado por el resistor de más bajo valor del círculo.

Si fuese posible todos los resistores estarían formados por líneas rectas y solamente en casos absolutamente necesarios se utilizarán líneas curvas. ello es debido a las mejores características en alta frecuencia, así como menor probabilidad de fallos en presencia de carga y humedad. Además es más difícil predecir el valor exacto de la resistencia final para cualquier línea que para la recta.

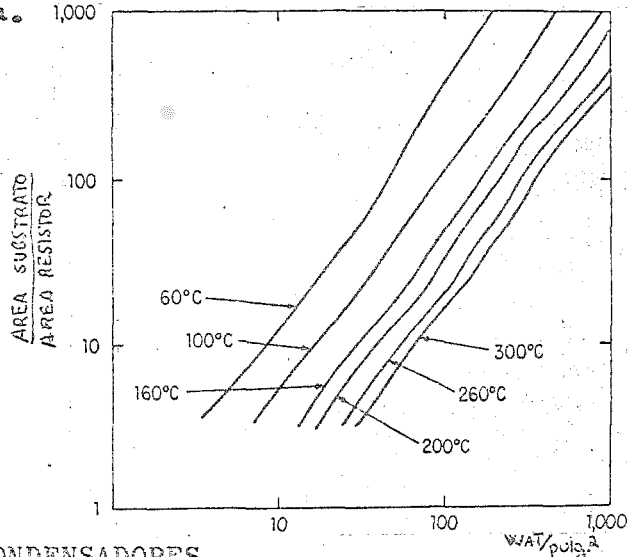
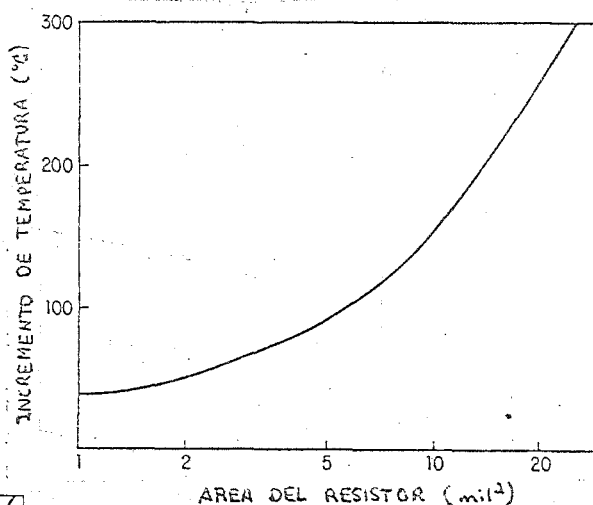
#### 69.1.3.2 ELECCION DEL AREA DEL RESISTOR.

Primero es necesario realizar un estudio de la capacidad de disipación de potencia del sistema con objeto de dar la mayor parte del área disponible a los resistores que disipan más potencia.

La disipación de potencia no es una característica del material, lo único que se puede especificar es la temperatura máxima y la densidad de corriente del resistor. La cantidad de potencia necesaria para alcanzar esa temperatura es una función compleja del material del sustrato, del montaje del sustrato, etc.

En la figura se observa el aumento de temperatura sobre el ambiente experimentado por un resistor en función de su área y para una densidad de potencia constante.

La temperatura que alcanza el resistor depende de su facilidad para conducir el calor al sustrato y de la facilidad de este para disipar el calor. La elevación de la temperatura vendrá dada por su tamaño así como por la relación de su área o la del sustrato, como se indica en la figura.



### 69.2 CONDENSADORES.

Gran número de materiales dieléctricos son de aplicación para la fabricación de condensadores de película fina, pero solamente son de utilización normal aquellos que presentan propiedades térmicas

y químicas estables. Como su mayor empleo se encuentra dentro del campo de los circuitos integrados, su deposición deberá de ser compatible con el resto de resistencias, y en general con todos los pasos de fabricación de tales circuitos.

En la tabla tenemos los dieléctricos más comúnmente usados

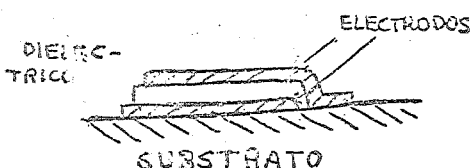
Material dieléctrico	Constante dieléctrica	Método de formación
$Ta_2O_5$	25	Pulverización, oxidación anódica.
$Al_2O_3$	9	Pulverización, oxidación anódica.
SiO	6	Evaporación.
$SiO_2$	4	Pulverización, oxidación.
Parylene	2'65	Polimeración al vacío.

En esta lista se incluye un polímero orgánico, dentro de este mismo tipo se está, actualmente, en vías de desarrollo de nuevos materiales con diferentes y mejores propiedades.

De todos ellos los más empleados son el SiO por evaporación y el  $Ta_2O_5$  por anodización.

Generalmente los condensadores de película fina tienen una configuración paralela, con dos capas conductoras separadas por una capa del dieléctrico apropiado y todo ello soportado por el sustrato.

Aunque las propiedades del dieléctrico son de primera importancia, en muchos casos, sin embargo, los electrodos metálicos y los sustratos afectan a las propiedades del dieléctrico, por lo cual los materiales deben de ser considerados todos juntos.



#### 69.2.1 TIPOS DE PELICULAS DIELECTRICAS.

- 1) Materiales inorgánicos: Inicialmente los más utilizados han sido los materiales inorgánicos. De todos ellos uno de los más atractivos por su alta presión de vapor es el Monóxido de Silicio SiO. Se ha comprobado que los mejores efectos sobre el campo se obtienen con sustratos de vidrio o cerámica muy pulidos y con electrodos de aluminio. Se utiliza también Dióxido de Silicio  $SiO_2$ .
- 2) Oxidos metálicos: Otro tipo de dieléctricos son los constituidos por óxidos metálicos, desarrollados sobre gran cantidad de metales mediante varios procesos, que presentan buenas características eléctricas, tales como alta constante dieléctrica y alta resistencia eléctrica. La capa de óxido puede crecer sobre el metal por formación de iones de oxígeno en la superficie del metal, se facilita esta operación aplicando un campo eléctrico del orden de  $10^7$  V/cm que baja las barreras de energía que impiden la migración de los iones a través del óxido. Se han obtenido así capas coherentes y uniformes desde 50 a miles de micras de espesor.

- 3) Dieléctricos orgánicos: Los polímeros orgánicos ofrecen unas propiedades eléctricas y mecánicas que los hacen muy apropiados para su utilización como dieléctricos. Las propiedades de estos polímeros - que son más difíciles de obtener en los materiales inorgánicos y - los hace, por consiguiente más apreciados, incluyen la flexibilidad mecánica que permite doblarlos, y la posibilidad de utilizar técnicas de fabricación de las películas como pulverización, inversión en baño, o moldeo. Presentan además alta resistencia dieléctrica y bajos factores de disipación, entre ellos se puede disponer de una gran variedad de características eléctricas.

#### 69.2.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.

La utilidad de los diferentes tipos de aislamiento para aplicaciones a condensadores de película fina, está determinada, principalmente, por las propiedades y las dimensiones geométricas de las películas que puedan ser controladas durante el proceso de formación. En el caso de los condensadores, a diferencia del de los resistores, los valores de la capacidad no pueden ser variados fácilmente después de que la estructura del condensador está completo.

Por este motivo uno de los más importantes requisitos para un material aislante que va a ser utilizado en el condensador, es un buen control de la densidad de capacidad y de las dimensiones laterales del área efectiva del condensador durante el proceso de formación.

Otras propiedades que afectan al diseño del condensador y sus características son el tamaño la superficie y estabilidad como función de tensión, temperatura y frecuencia bajo varias condiciones de humedad.

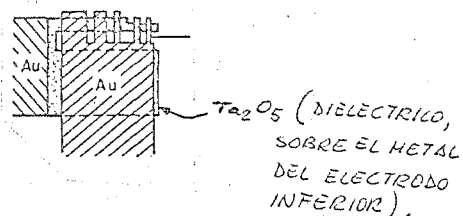
##### 69.2.2.1 TRAZADO DEL PATRON Y AJUSTE DEL CONDENSADOR.

En principio las propiedades que determinan las características del condensador son las del dieléctrico, sin embargo, en muchas ocasiones la elección del patrón de la estructura del condensador afecta a la precisión, características de frecuencia y comportamiento de la polarización.

Para obtener un valor deseado de capacidad es importante conseguir un buen control sobre la densidad de capacidad del elemento dieléctrico, lo que se puede hacer según el tipo de dieléctrico durante la deposición, por diferentes métodos, la capacidad total vendrá determinada por la densidad de capacidad y el área común entre electrodos.

Se observa, así, la influencia sobre la capacidad que presenta la presión y su grabación. Con máscaras y fotomáscaras bien realizadas se pueden alcanzar definiciones de  $\pm 8 \cdot 10^{-3}$  mm, pero las tolerancias debidas al posicionado de la máscara se deducen a  $\pm 3 \cdot 10^{-2}$  mm.

Para el ajuste del valor del condensador que ha sido fabricado completamente, se emplea el método de levantar parte del electrón metálico superior por procedimientos tales como erosión mediante un arco eléctrico, calentamiento con laser o ataque químico, pero todos ellos pueden tener efectos secundarios perjudiciales para la capa dieléctrica. Se fabrican también condensadores ajustables, que constan como se ve en la figura, de un gran área de capacidad y varias áreas pequeñas, donde se puede reducir la capacidad total por desconexión una o varias de las ramas del electrodo superior. Se





obtienen de esta forma variaciones de un 10% de la capacidad, al mismo tiempo que se pueden conseguir valores del condensador ajustable dentro de un 0,2% del valor deseado.

#### 69.2.2.2 PARASITOS DEL CONDENSADOR.

Las dos mayores contribuciones a los parásitos del condensador son las pérdidas en el dieléctrico y la resistencia serie de los electrodos. Otros parásitos que aparecen son la inductancia serie y la corriente de pérdidas. Esta última es más una medida de la calidad del dieléctrico que un parásito debido a que la mayor parte de los dieléctricos de película fina tiene una corriente de pérdidas tan baja, que no afecta a las propiedades del condensador. Esta corriente puede ser usada para determinar la resistencia de aislamiento.

#### 69.2.2.3 ESTABILIDAD DEL CONDENSADOR.

Una vez seleccionado el proceso completo de fabricación del condensador así como los materiales convenientes, para obtener rendimientos altos, se procede a la evaluación de la estabilidad del condensador bajo condiciones de tensión, temperatura y humedad. Para obtener esta información se someten grupos de condensadores a una amplia gama de condiciones de esfuerzos en función del tiempo. Se distinguen, entonces, dos tipos de fallos los destructivos por ruptura eléctrica y los que muestran cambios en la capacidad. Se han establecido así unas pruebas de vida aceleradas que permiten la extrapolación de los resultados a otras condiciones; igualmente permite determinar la tensión máxima de trabajo para cada estructura, así como el cambio de capacidad y factor de disipación esperados durante su tiempo de trabajo.

En la tabla se recogen los valores de la tensión de trabajo para diferentes condensadores de película fina de uso normal.

Dieléctrico.	Substrato.	Electrodo inferior.	Electrodo superior.	Gama de capacidad (NF)	Factor disipación tg a 1xHz	Coef. temp. ppm/°C	Tens. trabajo max.
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	vidrio	Ta	Au	5·10 <sup>2</sup> -5·10 <sup>4</sup>	0'003	200	50
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"	Ta	NiCr-Au	5·10 <sup>2</sup> -5·10 <sup>4</sup>	0'003	200	30
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"	Ta	MnO <sub>2</sub> -Au	5·10 <sup>2</sup> -5·10 <sup>6</sup>	0'01	400-700	75
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +SiO <sub>2</sub>	"	Ta	NiCr-Au	10-10 <sup>3</sup>	0'01	-	50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	Al	Al	10-10 <sup>5</sup>	0'004	300-500	50
SiO <sub>2</sub>	"	Al	Al	10-10 <sup>3</sup>	0'005	100-500	50
Parylene	"	Al	Al	5-10 <sup>3</sup>	0'0001	-100	60

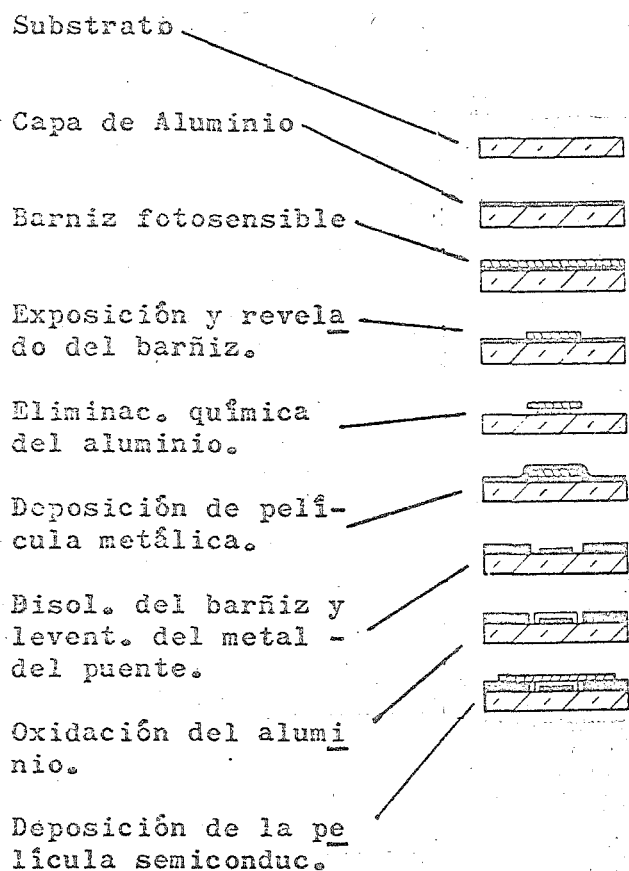
Todos trabajan a temperaturas inferiores a 100°C, con excepción del 39 y 59 puesto que su resistencia dieléctrica decrece rápidamente al aumentar la temperatura. El coeficiente de temperaturas superiores a 200°C sufre un cambio irreversible.

## 60.5 DISPOSITIVOS ACTIVOS.

La deposición de transistores de película fina sobre el mismo sustrato que componentes pasivos, permite la fabricación completa de circuitos integrados complejos. El depósito puede ser realizado por evaporación en vacío mediante máscaras móviles.

Se pueden producir dos tipos de transistores de película fina, los llamados de electrón caliente (Hot-electrón) y los de efecto campo, de estos solamente los de efecto campo han demostrado características eléctricas suficientemente buenas para permitir su uso en los circuitos. Estos transistores así obtenidos son similares eléctricamente a los de silicio de técnica Mos, pero tienen menos estabilidad y peor respuesta en frecuencia.

Otros componentes activos que se pueden obtener son diodos y elementos fotoconductivos.



Los pasos de fabricación de un transistor efecto campo mediante técnicas fotoresistivas para la delineación de patrones en lugar de usar máscaras mecánicas, se muestran en la figura. Como se ve tanto los electrodos como la puerta aislante han sido depositados antes que el semiconductor.

La capacidad para depositar transistores de película fina, diodos y fotoconductores, así como componentes pasivos sobre un sustrato aislante del precio económico, permite potenciar la importancia de los circuitos integrados en gran escala. Aunque los circuitos evaporados son inferiores a los de silicio en cuanto a características, pueden ser construidos, sin embargo, con menos defectos, dando lugar a circuitos más complejos sin conexiones selectivas.

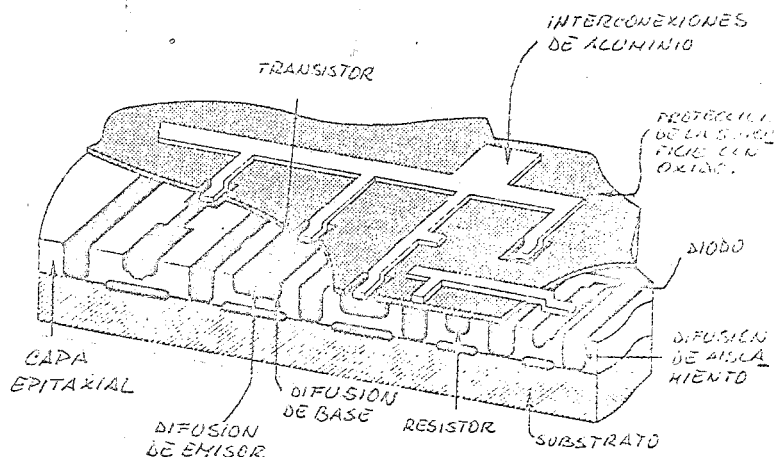
Con las mejoras de las características y métodos de fabricación que se están alcanzando progresivamente, los circuitos completamente integrados de película fina, tendrán aplicación en el futuro para aplicaciones especializadas tales como sensores de imagen de estado sólido y elementos reproductores de la imagen (pantallas).

## 70.1 COMPONENTES DE PELÍCULA FINA EN CIRCUITOS INTEGRADOS.

Un circuito integrado se puede describir simplemente como un diminuto bloque de semiconductores generalmente de silicio, que contiene regiones dopadas y en cuya superficie se han colocado perfectamente formadas películas finas de metales y aislantes.

El circuito integrado consta de un sustrato constituido por un cristal único de silicio, sobre él se hace crecer una capa epitelial de silicio adicional; en esta se constituyen las regiones dopadas por difusión que son las regiones de unión P-N y forman la parte eléctrica "activa" del circuito.

Estas regiones están eléctricamente separadas por otras regiones donde se difunde un aislante. Todo ello se cubre con una película fina (1 micra) de  $\text{SiO}_2$ , crecida sobre el silicio, su misión es la protección de las uniones contra las acciones exteriores, al mismo tiempo que actúa de aislante, sobre el cual se depositan películas finas de metal, generalmente de aluminio; estas sirven para realizar las conexiones eléctricas entre las áreas activas a través de unas ventanas practicadas en el óxido de silicio. Estas películas metálicas también pueden ser usadas para componer los resistores y condensadores. Generalmente el tamaño de estos bloques de silicio (chip) varía entre 1x1 mm. y 2'5x2'5 mm.



## 70.2 CONTACTOS.

Las exigencias bormales que se piden a los contactos metal-semiconductor M-S, son baja resistencia, característica tensión-corriente lineal (es decir que no se produzcan efectos rectificadores). El material utilizado generalmente para los contactos metálicos es el aluminio, son películas finas de aluminio depositadas por evaporación al vacío sobre obleas de silicio. Se procede previamente a grabar por técnicas fotolitográficas sobre el metal la configuración de la interconexión; después para asegurar una baja resistencia se somete a un tratamiento térmico, durante el cual el aluminio reduce una parte  $\text{SiO}_2$  y se produce una interdifusión Si-Al, que facilita el contacto físico con la superficie del semiconductor. A la temperatura de aleación el silicio se difunde mucho más rápidamente en el aluminio, que el aluminio en el silicio. La Difusión de silicio en aluminio puede continuar hasta que el aluminio se ha saturado (alrededor de 1'5% a 550°C). A esta temperatura y para un tiempo de aplicación de 10 minutos, la profundidad de difusión del silicio en el aluminio es de  $10^{-3}$  cm., alcanzando se una disolución anisotrópica.

Se puede producir una disolución lateral del silicio, bajo el  $\text{SiO}_2$  adyacente al contacto, dando lugar a pequeñas zonas de disolución superficiales (poco profundas) alrededor de las áreas de contacto. En casos extremos este fenómeno puede llegar a causar cortos entre emisores a poca distancia, e incluso se puede producir una penetración hasta la superficie del emisor si este se encuentra a poca profundidad.

Otro efecto secundario a que se puede dar lugar es a la precipitación del silicio, por enfriamiento de la estructura después de la aleación, con lo que el aluminio se llega a sobresaturar.

Recientemente se ha utilizado otro método de realización de los contactos, que consiste en la pulverización de una fina capa de platino (0,05 micras) sobre la oblea de silicio, sintetizándose mediante un tratamiento térmico a 600 ó 700°C. Se forman silicatos de platino en las áreas de contacto sobre la sintetización. La interconexión -

se produce por metalización con titanio, platino y oro. En este método no se producen difusiones laterales apreciables del silicio.

### 70.3 INTERCONEXIONES.

La metalización de interconexión en circuitos integrados permite la unión de las diferentes zonas activas, para constituir la función completa del circuito. Igualmente sirven para conectar el circuito con el exterior.

#### 70.3.1 REQUISITOS.

Se puede resumir los requisitos necesarios para las interconexiones de película fina en la forma siguiente:

- 1) El proceso de deposición debe de ser compatible con las técnicas - fotolitográficas de alta resolución. Medidas normales para este tipo de interconexiones son 1 micra de espesor y 10 micras de anchura.
- 2) Deben de tener muy baja resistividad, generalmente de  $4 \times 10^{-6} \Omega / \text{cm}$  ó menos.
- 3) Debe de establecer un buen contacto homico con el silicio fuertemente dopado, tanto tipo P como N.
- 4) Admitirá una razonable densidad de corriente. Actualmente la mayor parte de los circuitos necesitan de 1 a  $3 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ .
- 5) El metal no se oxidará ni se corroerá.
- 6) La película debe de adherirse bien al Si y Al  $\text{SiO}_2$  y ser compatible con las uniones externas.
- 7) Es deseable una buena resistencia mecánica al rayado (dureza).
- 8) El metal debe de resistir procesos a alta temperatura, por ejemplo para la operación de encapsulado.
- 9) La deposición y fabricación deben de ser económicas.

#### 70.3.2 MATERIALES ESPECIFICOS.

Ningún metal simple puede cumplir todos los requisitos anteriores, por lo que es necesario alcanzar un equilibrio. Los tres tipos de interconexiones utilizados actualmente son:

- 1) Aluminio: Es el más utilizado pues cumple casi todos los requisitos bastante bien, sus mayores inconvenientes se encuentran en que se ve afectado por la corrosión y tiene baja resistencia al rayado.
- 2) Molibdeno-oro: Para este sistema se pulveriza previamente una fina capa de Mo, sirviendo como contacto ohmico con el silicio y como adherente para el  $\text{SiO}_2$ . A continuación se deposita una capa de oro, que constituye el conductor principal. Tiene ventajas respecto al anterior, como su dureza, sin embargo es más caro y no ofrece resistencia a la corrosión.
- 3) Titanio-Platino-Oro: Primero se pulveriza una fina capa de platino sobre el silicio, que se sinteriza para formar los contactos; a continuación otra capa de titanio y otra de platino por pulverización,

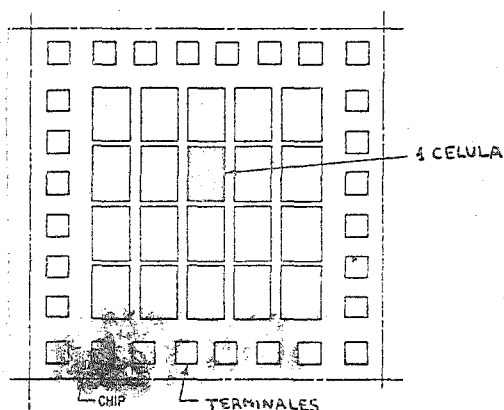
y finalmente otra de oro por evaporación o electrolaminado. El oro es el conductor, el platino es una barrera inerte bajo él, y el titanio sirve como adherente al dieléctrico. La principal ventaja de este sistema es su alta resistencia a la corrosión y su buena estabilidad a temperaturas moderadamente altas (350°C).

#### 70.4 ESTRUCTURA MULTICAPA.

La evolución de la metalización multicapa en un bloque (chip) de circuito integrado de silicio es un resultado lógico de la capacidad alcanzada por los más simples circuitos de un solo nivel. Esta evaluación es el equilibrio entre la creciente complejidad funcional que exige chips de mayor superficie, y el mantenimiento de un alto rendimiento que tiende a reducir esa superficie. Para un tamaño dado del área del chip de silicio se puede incrementar la complejidad del patrón metalizado mediante el empleo de una estructura de más de una capa de metal. La primera capa de metal de un circuito integrado simple típico se cubre con una capa de dieléctrico aislante, y entonces se deposita una segunda capa metálica sobre el dieléctrico.

Un ejemplo lo encontramos en las estructuras Mos (Metal-óxido-semiconductor) que están formadas por más de una capa, en la que un chip típico de dos capas de 1'5x1'5 mm. puede alcanzar 100 puertas lógicas (300 a 500 componentes).

En la figura podemos ver un chip Mos constituido por 20 células, cada una de las cuales es una matriz de resistencias y transistores Mos, conectados mediante metalización de aluminio para formar un bloque lógico fundamental. Mediante una capa dieléctrica y una segunda capa metálica las células se interconectan para formar un subsistema lógico.



La comunicación entre niveles de metal se realiza mediante pequeños agujeros circulares, llamados "vías", en el dieléctrico.

La disposición geométrica particular de los componentes y circuitos en un chip de silicio para conseguir las funciones lógicas deseadas se puede realizar por una estructura multicapa, que varía de acuerdo con las necesidades de cada diseño.

##### 70.4.1 MATERIALES.

Los materiales empleados como aislante dieléctrico para circuitos integrados multicapa se caracterizan por su composición y por el proceso utilizado para la deposición. Se da lugar así a una gran variedad de posibilidades.

En la tabla figura una selección de las combinaciones metal-dieléctrico más utilizados.

METAL		DIELECTRICO			Nº. DE CAPAS	
Material	Espesor (micra)	Material	Espesor (micra)	Proceso deposición	Metal	Dielec trico.
Al	0'5-1'5	SiO <sub>2</sub>	0'5-1'7	Pulveriza-- ción.	(3 (2	2 1
		SiO <sub>2</sub>	0'5-1	(Vapor (oxi dac. silano)	2	1
		SiO	0'5	Evaporado	2	1
		SiO	0'5	Pulverizado	2	1
		Borosilicato de alúmina.	0'6	(Vapor (oxi dac. silano)	(4 (2	3 1
Mo/Au/ Mo	0'1/0'7/ 0'1	SiO <sub>2</sub>	2-3	Pulveriza-- ción.	(3 (2	2 1

Como se ve la complejidad de la estructura multicapa - varía desde la más simple que está constituida por dos de metal y - una de dieléctrico, hasta 4 de metal y 3 de dieléctrico.

El control del espesor es importante para asegurar un aislamiento adecuado y para evitar poros.

#### 70.4.2 COMUNICACIONES ENTRE NIVELES.

La comunicación entre niveles de metalización se realiza mediante el contacto entre las diferentes capas de metal a través de aperturas en las capas dieléctricas. Para evitar la aparición de resistencias eléctricas no deseadas debidas a los contactos, varios factores como el tamaño de los agujeros y los residuos en las superficies metálicas juegan un importante papel.

En efecto cuanto más pequeño es el tamaño del agujero o vía, se hace más difícil el control de la reducida dimensión y de la profundidad del grabado. El peligro es la tendencia a atacar la parte inferior de la capa metálica en el esfuerzo para eliminar todo el dieléctrico.

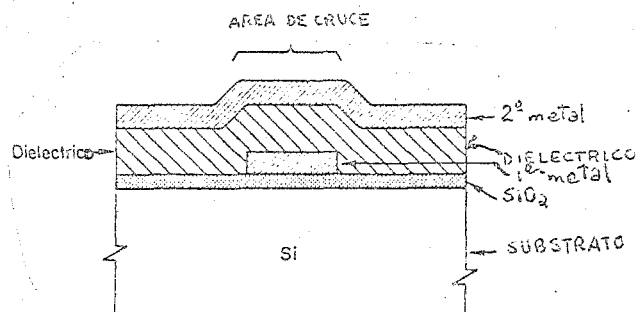
Del mismo modo los residuos depositados sobre el metal como resultado del grabado y de los pasos de limpieza, pueden crear serios problemas de resistencia entre niveles. Esto ha dado lugar, - en algunos casos, a abandonar el uso del SiO en favor del SiO<sub>2</sub> como dieléctricos.

Incluso el uso de una descarga luminosa para la limpieza de la primera capa metálica antes de la deposición de la segunda, se ha mostrado insuficiente para eliminar estas dificultades.

El SiO<sub>2</sub> pulverizado puede reaccionar con el aluminio - para formar residuos insolubles, que requiere un sobre ataque perjudicial del óxido para asegurar su eliminación.

### 70.4.3 CRUCES.

En la figura se presenta el diagrama esquemático de un cruce de capas metálicas en un circuito multicapa. El número de estos cruces puede ser muy grande dependiendo de la complejidad del circuito y de la anchura de los recorridos de metal. En la figura se puede observar que un poro, una fisura, o cualquier otro defecto similar en el área de cruce puede causar un corto entre las dos capas metálicas produciéndose la pérdida de la función del circuito.



Los defectos que pueden destruir los cruces aparecen por muchas razones, en la mayor parte de los casos se debe a la presencia de la contaminación, a los residuos metálicos en la superficie, a los poros, fisuras o sobreataque del dieléctrico aparecidos durante la deposición, o a la excesiva penetración de la capa metálica superior durante el tratamiento térmico. Evidentemente cuanto más fino es el dieléctrico es más propenso a estos defectos, esto da lugar a un espesor mínimo del dieléctrico.

### 70.5 CONSIDERACIONES DE FIABILIDAD.

Cualquier componente electrónico es juzgado en base a tres criterios: Características, coste y fiabilidad. Los tres se interrelacionan entre sí y con otros durante el proceso de fabricación, por lo que es muy difícil establecer la fiabilidad que un material debe tener. Una vez encontradas las especificaciones de fiabilidad mínima, se debe probar cuidadosamente los materiales para asegurarse de sus propiedades.

Un componente fiable necesitará, por difusión, muchos años para que se produzca un fallo trabajando en condiciones normales; por este motivo, con objeto de poder estudiar la fiabilidad esperada de un componente determinado, se han establecido varias pruebas aceleradas, que se clasifican en tres categorías: temperatura, humedad y carga. Todas ellas pueden usarse solas o en combinación.

- 1) Temperatura: Es la prueba más fácil de realizar y la que más se utiliza. El envejecimiento térmico da una medida de la cantidad de oxidación así como de los cambios internos que se pueden producir, tales como precipitación.

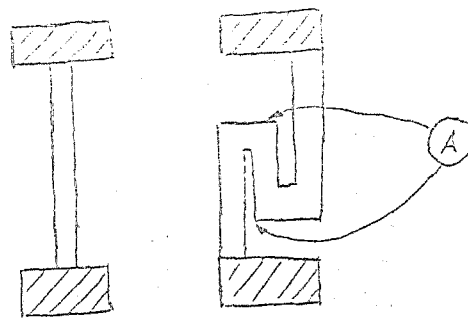
Aunque en la práctica estos datos así obtenidos por envejecimiento térmico no ofrecen una completa garantía en términos de fiabilidad, ciertas pruebas aceleradas son aceptadas generalmente en la industria.

Al mismo tiempo el propio tratamiento térmico aplicado durante un determinado número de horas sirve para estabilizar el componente.

- 2) Humedad: La exposición del componente a la humedad es en realidad una prueba del recubrimiento protector que éste debe tener.

Las condiciones de prueba normales varían de 85° a 95°C con una humedad relativa de 85 a 95% de humedad. Esta prueba es más significativa cuando se combina con una carga, puesto que el principal problema del componente es su corrosión electrolítica. Aquí influye

también la geometría del componente, puesto que el máximo campo eléctrico posible entre dos puntos de la superficie del sustrato será mayor, en el caso de las dos resistencias de igual valor de la figura, para la quebrada que para la recta y estrecha.



(A) REGIONES DE ALTO CAMPO LOCAL

- 3) Carga: Existen varios mecanismos bastantes diferentes uno de otro que pueden causar importantes derivas en el componente bajo carga. Es importante identificar en cada caso particular el mecanismo responsable de la misma, con objeto de preparar la prueba acelerada de vida apropiada al caso. Así por ejemplo, para corrosión electrolítica la condición de prueba es una tensión máxima aplicada con humedad condensada sobre la superficie del componente.

Otro mecanismo como puede ser la migración del metal es debido al paso de una densidad de corriente elevada a través del espesor (de la sección) de la película.

Para el caso de circuitos integrados de película fina aparecen otras restricciones que hay que tener en cuenta, tales como que las películas metálicas deben de mantener más propiedades como:

- a) Baja resistencia del contacto entre película metálica y semiconductor.
- b) Baja resistencia del contacto entre película y conexión externa.
- c) Baja resistencia eléctrica a lo largo de la película metálica.
- d) Buenas propiedades mecánicas tales como adherencia al sustrato o resistencia en las uniones con las conexiones externas.

Un mal control durante el proceso de fabricación conduce a una serie de defectos que dan lugar a una rápida degradación de la película metálica.

Como la mayor parte de los circuitos integrados actuales están fabricados con película metálica de aluminio, es éste del que se dispone mayor información de fallos.

Los mecanismos de fallos más comunes son:

- a) Resistencia del contacto: En la conexión entre la película de aluminio puro y el semiconductor aparece un peligro potencial de que el silicio se disuelva en el aluminio a la temperatura de envejecimiento, aumentando la resistencia eléctrica cuando los contactos de aluminio están altamente dopados con silicio de tipo N.
- b) Resistencia del contacto entre la película y la conexión externa: Si la unión se realiza con un metal diferente pueden aparecer cambios o envejecimiento en la resistencia del contacto, especialmente a temperatura elevada la resistencia aumenta mucho mostrando incluso características intermitentes. Los metales diferentes también pueden dar lugar a un ataque electroquímico de la película.
- c) Resistencia de la película: Se debe a la pérdida de la conductividad elevada a lo largo del recorrido de la película metálica, debido a almacenamientos en alta temperatura o al periodo de trabajo del elemento.



Esta pérdida puede tener lugar por reacción entre el metal y el  $\text{SiO}_2$ , por interdifusión de metales, por oxidación, o por discontinuidades provocadas por migración del material debido a electrotransporte.

- d) Adherencia de la película y resistencia de la unión: Después de un largo período de trabajo, incluso en condiciones de temperatura ambiente moderada, se produce una escamación (formación de copos) en el material de la película (aluminio) atribuido a electrotransporte.
- c) Fallos en la superficie: La técnica de formación de uniones bajo óxido de silicio reduce bastante, pero no elimina totalmente, los problemas de la superficie. Hay dos tipos de efectos en ella que pueden causar grandes dificultades:
  - 1) Contaminación cónica en o sobre la capa de vidrio, pero no dentro del propio silicio.
  - 2) Efectos inducidos en la propia superficie del silicio (acumulación o desaparición de impurezas, e incluso inversión del tipo de impureza).

## CIRCUITOS DE CAPAS GRUESAS

### 0. INTRODUCCION.

Los circuitos de capas gruesas (CCG) están alcanzando una espectacular difusión como técnica complementaria en la electrónica. Su gran interés radica en que su diseño es más económico que en el caso de circuitos de capa delgada (CCD), y por supuesto muchísimo menor que para los circuitos integrados (CI). Además el equipo industrial o de laboratorio, y la tecnología necesaria para su puesta a punto son bastante menores que en los CCD y por supuesto que en los CI.

Resumiendo los casos generales de aplicación y uso de los CCG, podemos destacar los siguientes:

- 1.- Necesidad de miniaturizar circuitos cuya pequeña o mediana serio no se puede realizar económicamente en CCD ó CI.
- 2.- Realización de circuitos no integrados por causa de las elevadas potencias o frecuencias de trabajo.
- 3.- Realización de circuitos híbridos (CH) con chips monolíticos en que las interconexiones y los componentes de elevado valor óptico, capacitivo, etc., se realizan en capa gruesa o añadiéndolos en forma de chips discretos.
- 4.- Pequeñas series de fabricación repetida en sucesivas ocasiones en que se realiza el diseño y preparación del trabajo de una vez para todas.
- 5.- Rápida puesta en el mercado en tan solo unas semanas, tiempo imposible de lograr con CCD ó CI.

No hay que olvidar tampoco la rápida adaptación de personal poco especializado a esta técnica, que permite una rápida puesta en marcha de esta tecnología.

Los circuitos pueden ser complejos, ya que el circuito puede realizarse en forma multicapa, esto es, separado mediante impresiones de aislantes distintas capas conductoras. Empleando varios substratos superpuestos, el resultado es el mismo, con la ventaja de un mayor aislamiento eléctrico y una menor capacidad parásita entre los distintos planos circuitales. Ambas técnicas, multicapa y multisustrato, se aplican ventajosamente cuando se requiere una gran densidad de componentes.

### 1. METODO GENERAL DE FABRICACION.

Se parte de una plaquita cerámica de unas dimensiones medias de 20x50 mm., que se elige de forma que tenga buena conductividad térmica, sea inerte químicamente y con buena calidad superficial.

Sobre esta plaquita se depositan serigráficamente en forma sucesiva diversas pastas de materiales conductores, resistivos y aislantes de forma que se realizan interconexiones, resistores y condensadores. Eventualmente se pueden dejar islas metálicas para interconexiones o soldadura de chips.

Seguidamente de cada impresión serigráfica de una de las capas mencionadas la plaquita se hornea de forma que:

- 1.- Se elimina el vehículo líquido en el que estaba en suspensión el material conductor, resistivo o aislante.
- 2.- Haya una adherencia buena al sustrato que garantice una buena fiabilidad.
- 3.- Eventualmente se pueden producir transformaciones termoquímicas en los materiales depositados, para lograr de ellos unas características requeridas.

En una etapa siguiente se procede a un ajuste eléctrico de algunos componentes con excesiva tolerancia.

A continuación se procede a la colocación de terminales, - encapsulado, prueba eléctrica final, marcado y embalado.

En la figura se puede observar un esquema general del proceso.

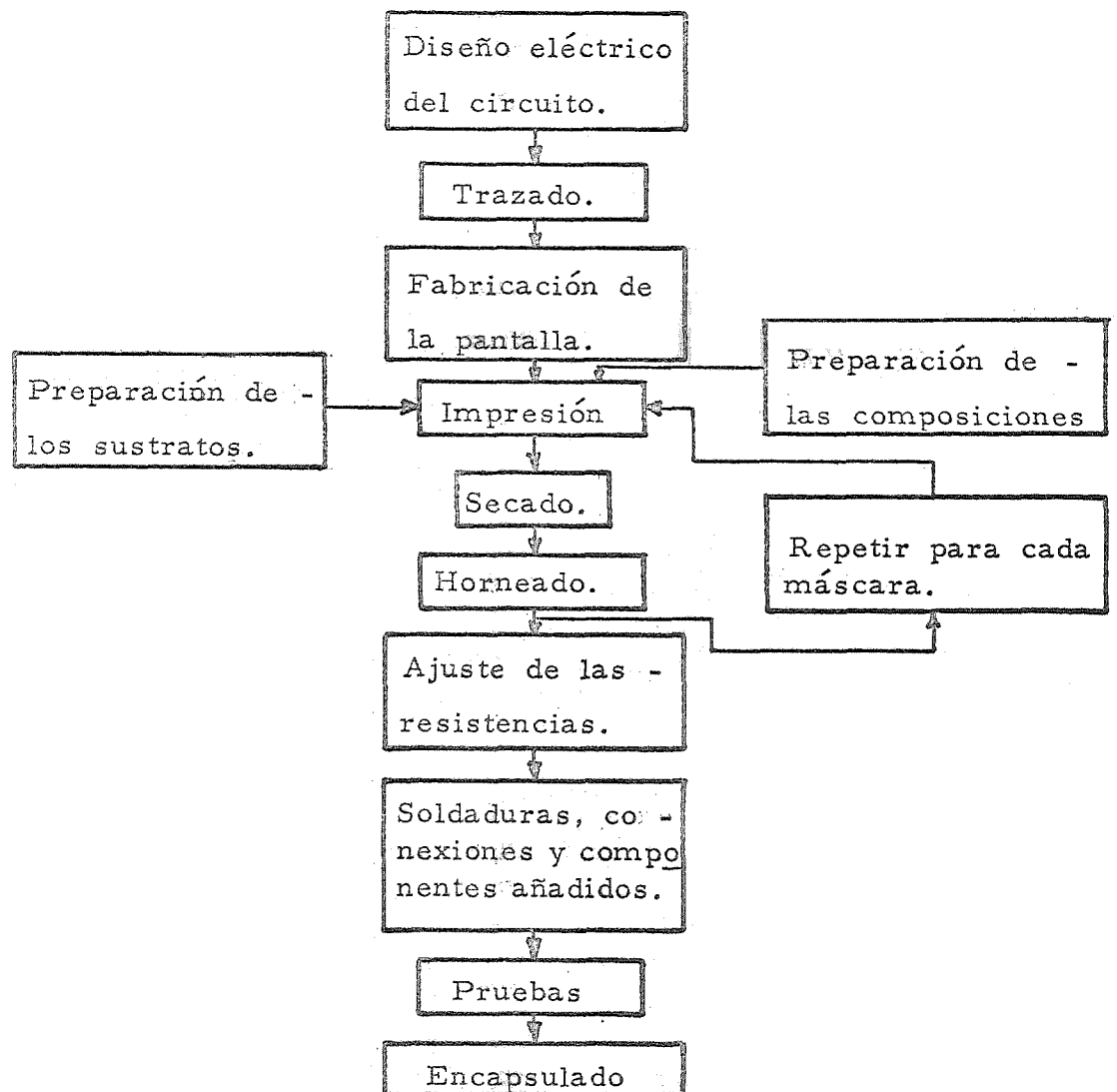
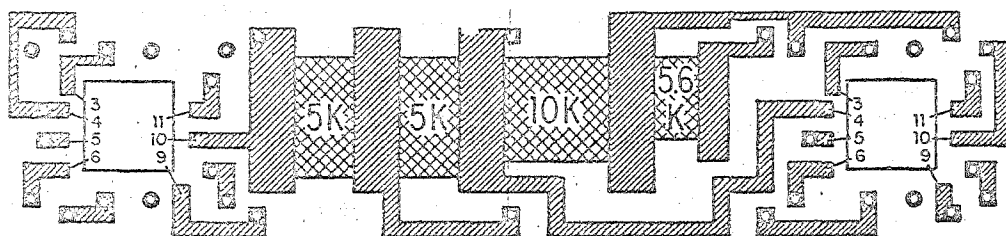


Fig. 4-1 Esquema de la fabricación de los circuitos de película gruesa.

La figura siguiente muestra la disposición en planta de un circuito en que los resistores (rayado doble) están conectados por líneas metálicas (rayado simple) a unos chips monolíticos y a terminales hacia el exterior.



## 2. CARACTERÍSTICAS GENERALES.

Los CCG además de las características enunciadas anteriormente permiten realizar en forma compacta y de gran fiabilidad circuitos que no tendrían tanta calidad en forma clásica y en forma más económica. No es de despreciar tampoco el ahorro de cobre y otros materiales que los CCG representan respecto a los circuitos convencionales.

A continuación se indica en la tabla nº. 1 algunas de las propiedades eléctricas más características, comparándolas con los de los CCD, con los que puede haber duda, en algunos casos, de usar una de ambas técnicas.

T A B L A 1

<u>Criterio</u>	<u>Película gruesa.</u>	<u>Película fina.</u>
Tolerancia inicial de las resistencias (%)	$\pm 10$ al 20	$\pm 5$
Tolerancia después del ajuste (%)	0'5	$\pm 0'1$
Potencia que pueden disipar (vatios/mm <sup>2</sup> )	0,1	0'025
Coefficiente de temperatura de las resistencias (ppm)	$\pm 100$	0
Resistividades de las composiciones (ohmios/cuadro).	1 a 10 Mo $\Omega$ m	0'1 a 1000
Ancho mínimo de las líneas (micras)	100 $\pm 10$	10 $\pm 1$
Capacidades obtenibles (pF)	10.000	10.000
Deriva tras 10.000 horas (%)	$\pm 1$	$\pm 0'1$
Costo unitario relativo	1	2 a 3

## SUBSTRATOS.

En general se usan cerámicas, ya que en los procesos de fabricación de éstas, se emplean temperaturas del orden de 1.500 a 1.900°C, lo que hace inmunes a las temperaturas de horneado del circuito que son del orden de unos 1.000°C o inferiores. Para la elección del tipo de substrato deben tenerse en cuenta un gran número de factores tales como rugosidad superficial, conductividad térmica, alabeo, coeficiente de dilatación, comportamiento ante la humedad, resistencias mecánicas, características como aislantes y dieléctrico y compatibilidad con otros materiales

del proceso subsiguiente. Afortunadamente, la experiencia ha avalado ya la conveniencia de elegir entre uno de los siguientes materiales, que tratamos a continuación.

### 3.1 ALUMINA.

Lo más común es usar alúmina policristalina, partiendo de una materia prima de un 96% de pureza, que compagina las necesidades técnicas con el coste. La rugosidad debe estar comprendida entre 0,2 y 1 micra, ya que si es superior, no se obtendría la finura y tolerancia deseada y, si es menor, la adhesión sería demasiado pequeña.

### 3.2 TITANATOS.

Se usan cuando se desean condensadores de relativamente alta capacidad, ya que entonces puede usarse el sustrato como dieléctrico, al que se imprimen por las dos caras opuestas los electrodos del condensador. Los materiales y procesos, si se utiliza este tipo de sustrato, son algo diferentes a los comúnmente usados.

### 3.3 ESTEATITA.

Mucho más barata que la alúmina y de peores características, se usó antes de que la producción y técnica actuales hiciesen rentable la alúmina. Se usa actualmente como soporte de resistencias y potenciómetros discretos.

### 3.4 BERILIA.

Más cara que la alúmina, tiene sobre ésta la ventaja de una mucha mayor capacidad térmica, por lo que se emplea ventajosa cuando el circuito debe disipar gran cantidad de calor. Debe hacerse notar la elevada toxicidad de la berilia, por lo que operaciones tales como pulido, taladro, o procesos que se realicen a alta temperatura en atmósferas húmedas, debe preverse el uso de equipo especial que impida la dispersión en el aire de polvos o humos. Esto debe tenerse en cuenta en el ajuste de las resistencias por abrasión.

### 3.5 MECANIZADO DE LOS SUBSTRATOS.

El mecanizado de las cerámicas, una vez endurecidas es sumamente difícil y costoso, por lo que debe ser evitado en lo posible. Si se necesitan taladros especiales o agujeros, deben efectuarse en la cerámica antes de endurecerla. Hay en el mercado una amplia variedad de sustratos normalizados, presentando varios de ellos diversos tipos de taladros ya efectuados. De todos modos; si es absolutamente necesario, pueden emplearse brocas con punta de diamante para taladros o punzones con punta de diamante para efectuar cortes, en orden a reducir el tamaño del sustrato en una o más dimensiones.

## 4. TRAZADO.

Denominamos trazado a la distribución en planta; esto es, al diseño de la red de conductores y componentes en cuanto a sus dimensiones y situación en el sustrato.

Deben establecerse unas reglas comunes, no solo para que sean compatibles proceso y equipo para una aplicación determinada, sino también, y fundamentalmente, para aumentar el rendimiento de fabricación.

En primer lugar, debe calcularse el área total disponible; teniendo en cuenta que este área debe contener no solo el circuito impreso en sí, sino también los componentes discretos a añadir, (estén o no en forma de chip), los terminales necesarios de entradas, salidas, etc. A continuación se tratan los pasos necesarios.

#### 4.1 RESISTORES.

Para calcular el tamaño superficial de los resistores haremos uso de las conocidas fórmulas de las resistencias planas.

$$R = \frac{\rho l}{tW}$$

donde  $R$  es la resistencia,  $\rho$  la resistividad,  $l$  la longitud,  $t$  el grueso y  $W$  el ancho de la resistencia. Si el grueso  $t$  de la resistencia es constante podemos poner

$$\rho' = \frac{R}{t} \quad \text{luego } R = \rho' \frac{l}{W}$$

Si consideramos una resistencia cuadrada, esto es,  $L=W$ , la resistencia resulta ser  $R = \rho'$  lo que nos indica que  $\rho'$  es la resistencia de un cuadrado de la película en cuestión, y, por tanto, se mide en ohmios/cuadrado. Si nos fijamos además en que  $\frac{l}{W} = N$  = número de cuadrados que forman la resistencia, las fórmulas que nos quedan en definitiva son:

$$R = \rho' N \quad N = \frac{R}{\rho'} = \frac{l}{W}$$

ejemplos:

- 19) ¿Qué resistencia tiene una impresión de 6 mm. de longitud y 2 de anchura con una tinta de resistividad  $\rho' = 12.500$  ohmios/cuadrado?  
Solución:

$$R = \rho' \frac{l}{W} = 12.500 \frac{6}{2} = 37.500$$

- 20) ¿Cuántos cuadrados se necesitan para imprimir 37.500 ohmios con una tinta de  $\rho' = 12.500$  ohmios/cuadrado? Será

$$N = \frac{R}{\rho'} = \frac{37.500}{12.500} = 3 \text{ cuadrados}$$

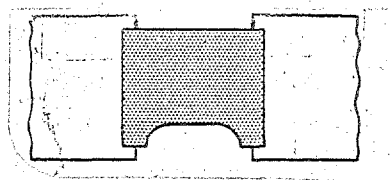
Obsérvese que esta resistencia podemos realizarla en 6x2 mm. ó 3x1, 9x3 etc. Las dimensiones exactas, nos vendrán luego fijadas al determinar la potencia que debe disipar.

Ya que la precisión con que se obtienen las resistencias después del horneado, es de un 20 a un 30%, éstas suelen ajustarse. Este ajuste se realiza por abrasión, y por consiguiente, el área de la resistencia debe elegirse al diseñarla, de tal modo, que su valor (ohmios) sea aproximadamente el 85% del deseado. La resistencia se llevará luego por ajuste a su valor correcto. Ejemplo. ¿Qué valor debe usarse para una resistencia si queremos que al final tenga 37.500 ohmios? Será:

$$R = 37.500 \times 0,85 \approx 31,9 \text{ K}$$

Si queremos realizar con tinta de  $\rho' = 12.500$  ohmios/cuadrado el número  $N$  de cuadrados será:

$$N = \frac{R}{\rho'} = \frac{31,8}{12,5} = 2,54 \text{ cuadrados.}$$



Resistencia ajustada.

Si el largo de la resistencia es  $l = 6\text{ mm}$ , el ancho  $W$  será:

$$W = \frac{l}{N} = \frac{6}{2'54} = 2'36\text{ mm.}$$

A continuación se dan unas normas que conviene tener en cuenta al diseñar resistencias.

- 19) Como norma general, la resistencia será tan grande como lo permita el área disponible en el sustrato.
- 29) Los patrones de las resistencias deben ser rectangulares y no en zig-zag para permitir su ajuste.
- 39) Para resistencias con alto valor de la razón de aspecto se recomienda la forma de sombrero tal como indica la figura siguiente.
- 49) No deben incluirse en el diseño bucles cerrados de resistencias, ya que no permiten efectuar las medidas necesarias para el ajuste.
- 59) La composición resistiva debe ser tal, que su resistividad permita realizar todas las resistencias del circuito, en una única impresión (atendiendo a dimensiones mínimas o máximas toleradas).
- 69) Un valor de seguridad, para disipación del calor, en resistencias, es 35 vatios/pulgada de resistencia a  $125^{\circ}\text{C}$ . Si por ejemplo tenemos una resistencia de  $6 \times 2\text{ mm}$ . esto es 0,0186 pulgadas la potencia que podrá disipar será:



Resistencia de alta razón de aspecto antes y después del ajuste.

$$P = 35 \times 0,0186 = 0,65\text{ W}$$

- 79) Deben efectuarse cálculos similares para el sustrato completo, siendo un buen factor de diseño 5 vatios/pulgada, deben calcularse el calor disipado por cada elemento, para sumarse la contribución de todos y comparar con la capacidad de disipación del sustrato.

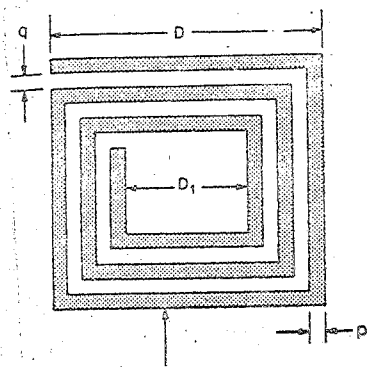
#### 4.2. CONDENSADORES.

Para integrar condensadores se imprime en primer lugar una de las placas metálicas seguida de dos impresiones de dieléctrico y a continuación el electrodo superior. Se realizan dos impresiones de dieléctrico para evitar el cortocircuito, que supondría un agujero en el aislante. De este modo, se consigue capacidades de hasta unos  $10\text{ nF}$  con una tolerancia que oscila entre un 20 y un 30%. Para mayor capacidad pueden realizarse condensadores multicapa, si bien se prefiere casi siempre realizarlos aparte e incorporarlos al circuito en forma discreta. La capacidad del condensador viene dada por  $C = 0'0885\text{ K} \frac{A}{E}$

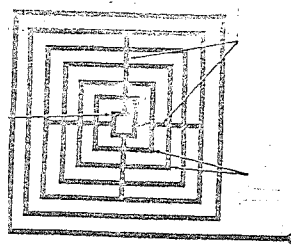
donde  $C$  es la capacidad en  $\text{pF}$ ,  $K$  la constante dieléctrica,  $A$  el área de solape de los electrodos ( $\text{cm}^2$ ) y el grueso del dieléctrico ( $\text{cm}$ ). Al principio del diseño se suponen los condensadores, y luego, si interesa, se cambia su geometría.

#### 4.3. INDUCTANCIAS.

Las inductancias impresas se usan poco ya que están limitadas a valores pequeños (un máximo práctico de unos  $10 \mu H$ ) y tienen un  $Q$  relativamente bajo; además de que a veces causan problemas de acoplos. Es por ello por lo que se realizan aparte y se incorporan al circuito en forma discreta. Un diseño típico de inductancia impresa lo muestra la figura, en la que debe hacerse notar:



Inductancia impresa.



Inductancia ajustada, seccionando el cortocircuito de la espiral.

que la espiral se extiende hasta el centro ( $D_1=0$ ) y que en las fórmulas se toma el ancho igual al espacio del conductor. Si las dimensiones son cm, las fórmulas de diseño para una inductancia en henrios son:

$$S = D^2$$

$$N = \frac{D}{2} (q+p)^{-1} = \frac{D}{2P} \left(1 + \frac{1}{r}\right)^{-1}$$

$$l = 4 \frac{D}{2} N = \frac{D^2}{P} \left(1 + \frac{1}{r}\right)^{-1}$$

$$L = 85 \times 10^{-10} DN^{5/3} = 27 \times 10^{-10} \frac{D^{8/3}}{5/3} \left(1 + \frac{1}{r}\right)^{5/3}$$

La figura anterior muestra una inductancia ajustable por medio de abrasión, quitando el adecuado número de cortos entre espirar.

#### 4.4 NORMAS GENERALES.

A continuación se da una lista que, sin pretender ser completa, ilustra diversos aspectos que deben tenerse en cuenta en el trazado:

- 1º) Todos los dibujos finales de trazado deben efectuarse a una escala de como mínimo 10:1.
- 2º) Por razón de economía, debe hacerse cuanto sea posible para que todas las impresiones queden al mismo lado del substrato.
- 3º) Todas las líneas deben ser paralelas a uno u otro de los dos ejes mayores. Esto es importante, entre otras razones, porque el ajuste de las resistencias se efectúa, normalmente, de modo más sencillo a lo largo de los ejes X o Y.
- 4º) Los cruces de conductores pueden realizarse de dos formas; bien mediante la impresión de un aislante entre ambos, bien mediante un puente realizado con hilo de conexión. En cualquier caso deben reducirse al mínimo número imprescindible.



- 88) Las conexiones deben ser tan cortas como sea posible. En conexiones que, por necesidad deban ser largas y la resistencia debe mantenerse baja, puede ser necesario aumentar la anchura. Tal es el caso por ejemplo de conexiones de masa.
- 89) El ancho y espaciado de los conductores es, como norma general, 0,01 pulgada; si bien puede emplearse valores mayores en orden a mantener la resistencia y aislamiento de los conductores en un mínimo.
- 79) Deben evitarse los agujeros en el sustrato porque esto es costoso y además la conexión es difícil. En cualquier caso, deben tener un diámetro mínimo de la mitad del espesor del sustrato y nunca menos que 0,015 pulgadas.
- 89) Deben respetarse las normas sancionadas por la práctica, respecto a los asientos para componentes añadidos; vacíos necesarios para permitir ajustar, solapes conductor-resistencia, terminales de entrada y salida etc. Estas medidas se encuentran tabuladas para la mayoría de las aplicaciones prácticas.

## 5. FABRICACION DE LA PANTALLA.

### 5.1 DIBUJO DEL PATRON.

Para fabricar la pantalla es necesario efectuar algún trabajo bajo precio. Una vez hecho el croquis, más o menos tosco del trazado debe ser transformado en un patrón exacto y preciso. Este patrón, en definitiva, no es más que una configuración de regiones alternativamente claras y opacas, en un medio dimensionalmente estable. Se efectúa a una escala mínima de 10:1 (normalmente será de 20:1) y, como consecuencia del tamaño, las tolerancias se satisfacen fácilmente. Puede confeccionarse pegando simplemente cintas adhesivas en una placa de Mylar, si bien normalmente, se necesita la mayor precisión que se logra en el uso del coordinatógrafo. Este aparato no es más que una máquina muy precisa de dibujar, algo sofisticada, y que guía a lo largo de los ejes X e Y, una cuchilla muy afilada. Para confeccionar el patrón, se usa una lámina de Mylar recubierta de una sustancia opaca, que se puede cortar y pelar, lo cual se efectúa con el coordinatógrafo. Existe una amplia variedad de estos instrumentos en el mercado desde los más simples que se manejan normalmente, hasta complicadas máquinas automáticas que efectúan el dibujo siguiendo las órdenes de un calculador electrónico, gobernado por cinta perforada.

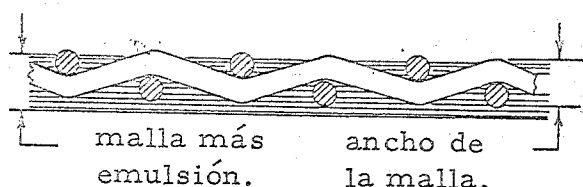
### 5.2 FOTORREDUCCION.

Una vez que tenemos los patrones, debemos reducirlos a la escala 1:1, de modo que podemos confeccionar las pantallas en su tamaño real. La fotorreducción, no es tan simple como pueda parecer a simple vista, y es aquí, donde pueden producirse inexactitudes que afectarán a todos los restantes pasos del proceso. En pleo de equipo fotográfico inadecuado o mal ajustado, producirá impresiones en el dimensionado, y diferentes distorsiones, pudiéndose llegar incluso, a que desaparezcan las marcas de identificación de los patrones. También es de la mayor importancia cuidar la exposición a la luz y el revelado de la película. La precisión y estabilidad de la cámara deben cuidarse especialmente, por lo cual, ésta será más bien valuminosa y no precisamente barata. Después del revelado de la película, debe efectuarse una inspección, para lo cual puede emplearse, o una microrregla que establezca dimensiones punto a punto, o una unidad del tipo de dos ejes que detectará inmediatamente no solo distancias simples, sino también errores de coordenadas y condiciones de falta de paralelismo.

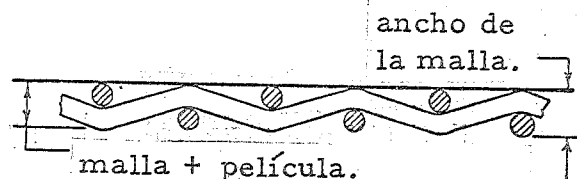
### 5.3 PANTALLAS.

Las pantallas más comúnmente usadas para la impresión, es tán hechas a base de una malla de hilos de acero inoxidable (a veces - nylon o seda) que está tensa en un bastidor de aluminio. Esta malla, se recubre de una emulsión fotosensible, la cual se fuerza a pasar a través de la red, de modo que quede nivelada por ambos lados. Esto incrementa el grueso de la pantalla entre 0,4 y 1 milésima de pulgada, lo cual está en definitiva, directamente relacionado con el grueso de la futura impre sión. A continuación, se impresiona a través del patrón por medio de luz ultravioleta, lográndose que la emulsión polimerice en unas zonas sí y - en otras no; de forma que, posteriormente, las tintas pasen por las zo-- nas preseleccionadas por el patrón. Estas pantallas tienen una vida útil, en buenas condiciones de servicio, de 10.000 a 25.000 impresiones.

Puede emplearse también un método indirecto en el cual el proceso fotográfico se realiza en una película de transferencia. Esta pe lícula de transferencia una vez revelada se adhiere a la malla. Con este tipo de pantallas la vida útil es sólo de 2.000 a 3.000 impresiones; el grueso de la impresión viene fijado solo por la malla, y el detalle del dibujo resultante es superior. Las figuras siguientes muestran los dos - tipos descritos anteriormente,



Pantalla de emulsión directa.



Pantalla de emulsión indirecta.

El espesor de la impresión, viene determinado fundamentalmente, por el número de hilos por pulgada que tiene la malla de que se - trate.

Se usa normalmente mallas que tienen entre 100 y 400 hilos/ pulgada. Consiguiéndose impresiones con un espesor comprendido entre 1 y 1/3 de milésima de pulgada (espesores medidos después del horneado).

Por último mencionaremos la existencia de máscaras metáli- cas realizadas por grabado al agua fuerte del patrón en una lámina metá- lica. Así se consigue un cuidadoso control de las composiciones deposita das en la impresión, junto a una gran exactitud de dibujo y una más lar- ga vida; todo ello a expensas de un mayor coste.

## 6. COMPOSICIONES.

### 6.1 PASTAS PARA RESISTENCIAS.

Las composiciones para resistencias, constan de una mezcla de partículas metálicas (generalmente paladio y plata) y vítreas, en un vehículo orgánico. El proceso de fabricación incluye como paso fundamen- tal, la oxidación del paladio por medio de un tratamiento al horno, según un perfil de temperaturas adecuado. La resistividad, en phmios por cuadra do, que se consigue, varía con el grueso de la impresión tal como indica la figura. Al cargar la resistencia, se producen primordialmente dos fe- nómenos, que dan lugar a una deriva de su valor. En primer lugar, ocurre que saltan arcos entre partículas metálicas próximas, lo cual produce sol daduras y en definitiva una disminución de la resistencia. Este fenómeno

es el responsable de la deriva negativa que se observa en las primeras horas funcionamiento. Por otra parte, si la resistencia está en contacto con el aire, el paladio puede seguir oxidándose lo cual provocará un aumento posterior de la resistencia. Este efecto puede evitarse, sin más que oxidar por completo el paladio en el horneado, y encapsulando adecuadamente el dispositivo, de modo que quede separado del aire. De todas formas, la estabilidad de las resistencias Paladio-Plata es buena. La figura 6.1. muestra una curva típica de deriva con el tiempo de almacenamiento a 150°C. Las resistencias impresas, pueden presentar un coeficiente de temperatura (TCR) positivo o negativo, que oscila entre 50 y 500 p.p.m.

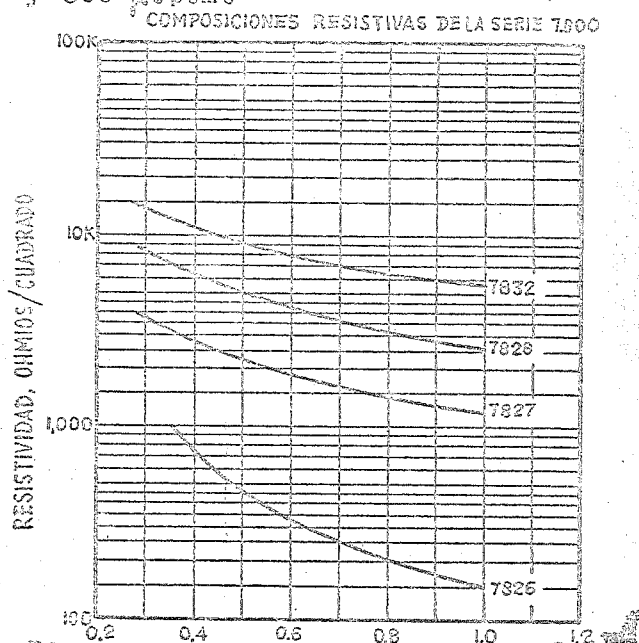


Fig. 6.1 Resistividad en función del grueso de la impresión.

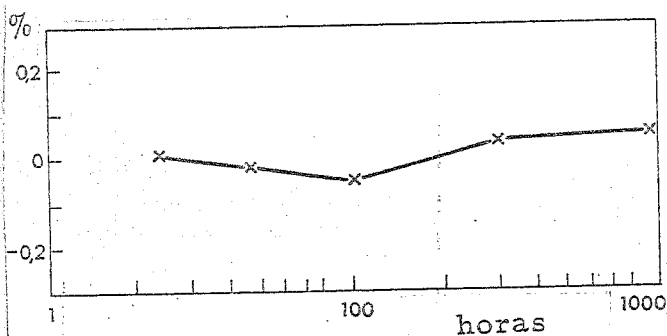


Fig. 6.2 Variación de la resistencia en almacenamiento a 150°C.

dependiendo de forma fundamental del grueso de la impresión y de la resistencia de la tinta utilizada (Fig. 6.3).

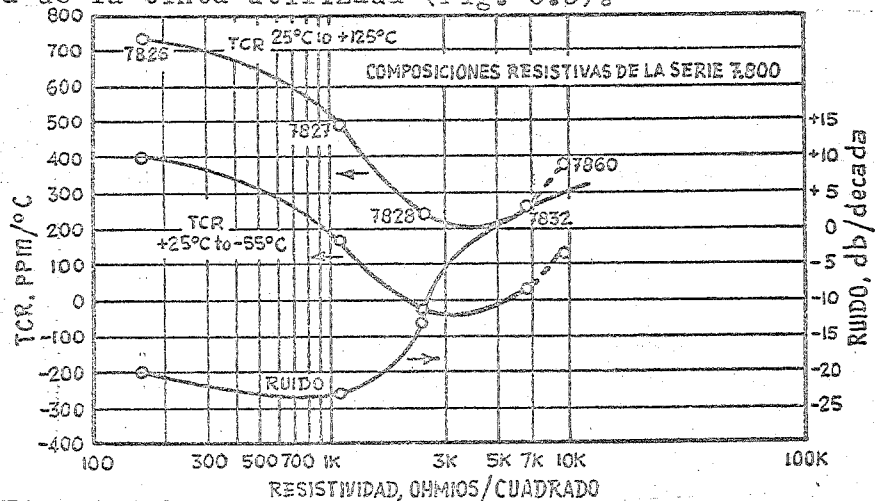


Fig. 6.3 Coeficiente de temperatura y ruido en diversas pastas resistivas.

El encapsulado de la resistencia aumenta la estabilidad, no solo por lo descrito hasta ahora sino también, porque el hidrógeno atmosférico puede reducir la composición.

### 6.2 PASTAS CONDUCTORAS.

Para realizar los conductores se utilizan composiciones que tienen metales nobles; fundamentalmente, oro, paladio-oro, platino-oro y

paladio-plata. Los factores a tener en cuenta para la elección de uno u otro tipo de tintas conductoras con: una buena resolución de líneas, buena adhesión, ausencia de fisuras, pequeña migración metálica, baja resistividad, facilidad de soldadura y bajo costo. Debe tenerse en cuenta, que la elección de un material de bajo costo, puede dar lugar a un encarecimiento del producto final, si este material implica complicados procesos de fabricación. Los conductores de oro, tienen baja resistencia y se suelen dar bien por termo-compresión, aunque no son buenos como terminaciones para las resistencias de paladio-plata, y no se pueden usar para las soldaduras clásicas de estaño-plomo. Las aleaciones paladio-oro, mejoran respecto al oro en cuanto a su compatibilidad con resistencias y dieléctricos, pero tampoco son sencillos de soldar. Las aleaciones paladio-plata, son fácilmente soldables con estaño-plomo y son más baratas, pero no tan resistentes mecánicamente como los materiales anteriores. Para electrodos de conductores se usan metales preciosos, aunque algunos fabricantes excluyen la plata por motivos de migración. La tabla 6.1 muestra un resumen de las características de los conductores.

T A B L A 6 . 1

Características de los conductores.

<u>Propiedad</u>	<u>Au</u>	<u>Pt-Au</u> <u>Pd-Au</u>	<u>Pd-Ag</u>
Temperatura de horneado (°C)	950	1000	850
Soldabilidad Sn-Pb	NO	BUENA	EXCELENTE
Terminación de resistencias	POBRE	BUENA	EXCELENTE
Adhesión en kg. para pelar bajo un ángulo de 90°.	0,5-1	0,5-1	1,5 a 2,5
Resistividad $10^{-3}$ ohmios/cuadrado	10	80-100	40
Migración	NO	NO	MODERADA

6.3 COMPOSICIONES AISLANTES.

Las composiciones aislantes se utilizan, no sólo como tales aislantes en cruces de conductores, sino también como dieléctricos - en condensadores y para sellar herméticamente las resistencias, previniendo el efecto reductor del hidrógeno atmosférico. A pesar de que cada uno exigiría, en principio unas características diferentes, debe tenderse, en lo posible, a utilizar un solo tipo de composición, con el fin de reducir el número de impresiones y recocidos.

Las pastas aislantes se obtienen en el mercado con una amplia variedad de características, siendo la resistencia de aislamiento superficial y volumétrica y sobre todo, la capacidad de quedar compactas y sin agujeros después del proceso de secado. En orden a asegurar una mínima probabilidad de cortocircuitos en cruces de conductores y en condensadores debe considerarse la posibilidad de efectuar dos impresiones (con dos secados y recocidos) para estos procesos.

Valores típicos a obtener en cruces en ángulo recto de conductores en un ancho de 20 milésimas de pulgada, son una capacidad de una capacidad de unos  $2\text{p F}$ , una resistencia de aislamiento superior a  $2 \times 10^{13}$  ohmios, y una tensión de unos 250 V de ruptura.

A los dieléctricos les afecta mucho la humedad atmosférica. La humedad absorbida disminuye la resistividad en volumen y aumenta la polarización del dieléctrico, mientras que la humedad absorbida, motiva que protones e hidroxilos migren por la superficie.

Para medir las resistividades superficiales y de volumen, deben tenerse las precauciones de rigor respecto a las zonas de guarda para independizar ambas corrientes. Normalmente, las resistencias se sellan una vez realizadas para minimizar cualquier cambio que pudieran sufrir, en el resto de las impresiones y horneados subsiguientes. Como consecuencia, al realizar el ajuste se destruye el encapsulado en el extremo tratado con el abrasivo, por lo que después del ajuste se destruye el encapsulado en el extremo tratado con el abrasivo, por lo que después del ajuste deben volver a sellarse. Esto tiene la ventaja de que esta última capa tiene el efecto de eliminar los agujeros que pudieran presentar la primera.

Para la realización de condensadores, tiene gran importancia la constante dieléctrica de la cerámica utilizada. Normalmente, el material básico es el titanato de bario, mezclado con otros titanatos, que hacen que el punto de Curie resultante se encuentre a la temperatura ambiente. Recordemos, que el punto de Curie, es la temperatura a la que el material pasa de ferroeléctrico a paraeléctrico, ya que pasa su estructura cristalina de hexagonal a cúbica. Con ello se consiguen valores muy grandes de la permitividad, aunque muy dependientes de la temperatura. Esto último se atenúa añadiendo algún contaminador que rodee los granos de perovskita, aún a costa de rebajar la permitividad. Las figuras 6.4 y 6.5 muestran esta dependencia. Debe tenerse en cuenta que la constante dieléctrica, puede quedar muy afectada por la temperatura de pico del horneado.

Los condensadores resultantes quedan afectados también por la polarización del dieléctrico, en forma que pueda determinarse mediante las previsiones de los fabricantes de la composición. El envejecimiento hace que la constante de tiempo disminuya con una tasa de 5 al 6% cada década, por lo que no afecta en absoluto para la gran mayoría de las aplicaciones.

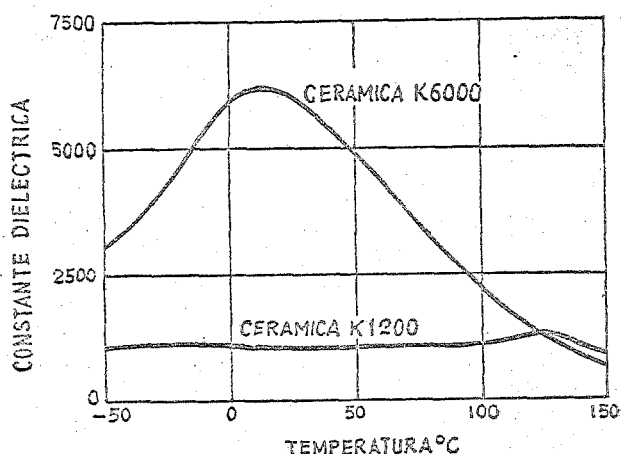


Fig. 6.4 Variaciones típicas de la constante dieléctrica sin la temperatura para cerámicas comerciales de alta K.

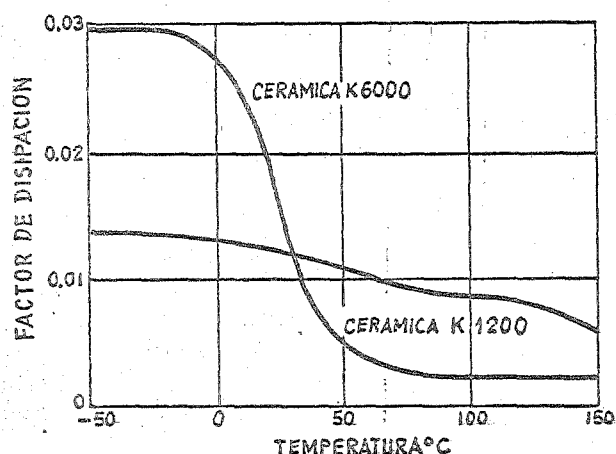


Fig. 6.5 Variación del factor de disipación para cerámicas comerciales de alta K.

## 6.4 MATERIALES ACTIVOS.

Los componentes activos se incorporan generalmente en forma de chip al sustrato, y su elaboración es completamente independiente del circuito híbrido en sí. No obstante se está investigando la posibilidad de imprimir también componentes activos. Se ha usado en algunos experimentos, sulfuro de cadmio en combinación en el óxido de silicio - como aislante, para realizar transistores de efecto de campo. La figura 6.6 muestra un dispositivo de esta naturaleza. Esto último, sin embargo, pertenece aún a la investigación y al laboratorio y no es todavía comercialmente utilizable.

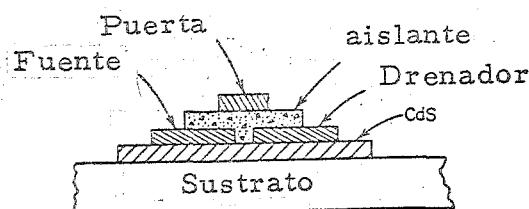


Fig. 6.6 Sección recta de un FET de película gruesa.

## 6.5 PREPARACION DE LAS COMPOSICIONES.

Antes de utilizar las composiciones es necesario homogenizar y dispersar los sólidos en el vehículo orgánico ya que durante el almacenaje pudieron haberse decantado. Esto puede realizarse a mano, re moviendo con una espátula de acero inoxidable hasta que no quede sedimento. Puede efectuarse también a máquina, pero teniendo en cuenta, que un rápido agitado, puede provocar drásticos aunque temporales cambios en la viscosidad. Una vez realizada la dispersión; por ejemplo, a la recepción de la composición, el almacenamiento subsiguiente puede efectuarse en recipientes que giren lentamente (3 a 10 revoluciones por hora). Aunque las composiciones se preparan con disolventes de baja presión de vapor, debe comprobarse la viscosidad antes de su uso y añadirse el disolvente adecuado cuando sea necesario. Pueden emplearse mezclas de varias pastas para, por ejemplo, conseguir resistividades intermedias, si bien es necesario tomar algunas precauciones para evitar sedimentos. Así ambas composiciones deben agitarse previamente por separado antes de la mezcla, y ésta efectuarse poco a poco.

Naturalmente las pastas se almacenan en un aparato que las tiene sometidas a un lento pero incesante movimiento, para que no se deshomogenicen.

## 7. IMPRESION.

El proceso de impresión, consiste en hacer pasar a través de las aberturas de la cámara, las diversas composiciones mediante una ligera presión por un método muy semejante a la serigrafía. Las mayores diferencias consisten, sobre todo, en la necesidad de obtener unas muy estrechas tolerancias, especialmente en la impresión de resistencias.

Los factores que afectan a la impresión son varios. En primer lugar, las máquinas impresoras deben tener microposicionadores para mantener el paralelismo entre pantalla y sustrato, y estar éste último adecuadamente dispuesto en los ejes X Y. La tensión de la malla en la pantalla y el número de hilos de ésta, afectan en gran medida al resultado final. Los conductores suelen imprimirse con redes de 200 a 325 hilos/pulgada, mientras que para las resistencias se usan mallas de 100 a 165 hilos/pulgada. La impresión debe ser automática, aún para uso de laboratorio ya que si no, las diferentes presiones ejercidas en la rasqueta -

darian lugar a diferentes espesores de depósito. Las rasquetas deben efectuar su recorrido con presión y velocidad uniforme, normalmente entre 5 y 30 cm/seg. y su recorrido es unidireccional. Debe proveerse a la máquina de una espátula que redistribuya la tinta entre cada dos pasadas. La inclinación de la rasqueta será normalmente de 45°. Se contruyen con meta-crilatos, neopreno, fluoelastómeros, etc., que soportan bien los disolventes a la vez que resisten la abrasión de las pastas vítreas y resistivas.

Existe en el mercado, una relativamente amplia variedad de máquinas impresoras, ofreciendo cada fabricante determinadas particularidades de constitución y manejo, tales como, impresión uni o bidireccional, uso de una o dos rasquetas etc. Como velocidad típica de impresión puede citarse la cifra de 700 u 800 impresiones/hora. Una vez que ha comenzado la impresión, no debe interrumpirse para que la tinta no se seque en la máscara y si el proceso se detiene por más de unos minutos debe efectuarse una limpieza.

Diremos por último que, en la impresión, debe llevarse un control del espesor del depósito en orden a obtener un buen rendimiento. Las medidas pueden efectuarse con un interferómetro, un microscopio de -foco calibrado o con un trazador de perfiles. El método más exacto es el del interferómetro, pero solo sirve para espesores muy delgados, ya que la medida está limitada por la longitud de onda de la luz que se utilice.

## 8. TRATAMIENTO TERMICO.

### 8.1 SECADO.

Después de la impresión y tras algunos minutos para permitir un asentamiento y nivelación de la pasta, se somete al sustrato a un proceso de secado para evaporar el disolvente. Puede realizarse al -aire libre, aunque normalmente no se usa por el excesivo tiempo necesario, puede acelerarse por medio de aire caliente. Como en otros medios -en los que se emplea calor, debe comprobarse cuidadosamente la velocidad de secado para que la pasta no se cuarte. La temperatura suele oscilar entre 100 y 150°C en un tiempo de unos 15 minutos. Puede usarse también un secado por medio de infrarrojos, que tiene la ventaja de ser mas lento y reducir el riesgo de cuarteamiento. En general, los mejores resultados se obtienen siguiendo las recomendaciones del fabricante.

### 8.2 RECOCIDO.

Las composiciones usadas en la impresión se someten a un -recocido según perfiles de temperatura adecuados. Se incluyen las figuras 8.1 y 8.2 que muestran perfiles típicos de tratamiento para resistencias y conductores.

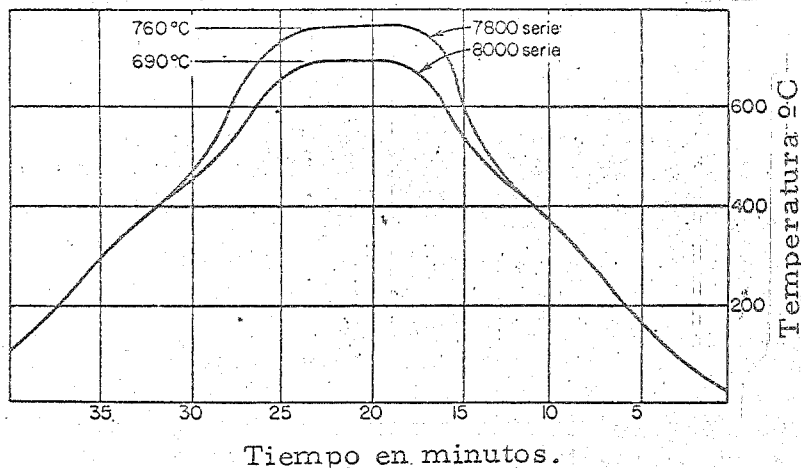


Fig. 8.1. Perfil de tratamiento térmico de las resistencias para dos series típicas.

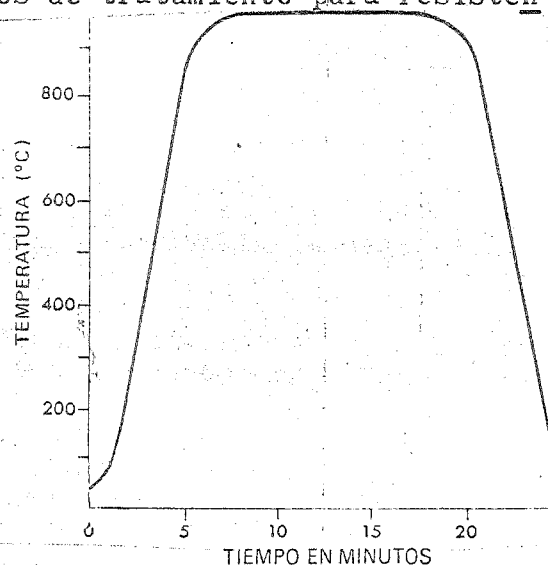


Fig. 8.2. Perfil de tratamiento térmico de conductores.

Durante el recocido, la pasta resistiva constituida por Pd, PdO, Ag y aglomerantes se seca por descomposición del aglomerante orgánico. La plata se alea con el paladio y se oxida parte del paladio. Debido a la alta temperatura, se forma una fase vítrea en la que hay una mezcla muy íntima de parte de la pasta con la zona superior del sustrato, por lo que la adherencia es óptima. Las reacciones son muy complejas ya que el PdO se descompone, ayudando catalíticamente por la plata a la que se alea, y en el enfriamiento parte del paladio vuelve a oxidarse. El perfil adecuado se consigue normalmente, por hornos continuos de dos bocas (una de entrada y otra de salida) provistos de unos 6 u 8 elementos calefactores, distribuidos en un espacio de unos 4 a 6 metros. El proceso es automático, regulándose los calefactores por medio de termopares y el control de temperaturas, es norma que se consigue con una precisión de  $\pm 20^\circ\text{C}$ . Por último, debe provocarse una corriente continua de aire de unos 10 cm/seg de velocidad, para arrastrar los gases resultantes de la descomposición y contribuir a la pirólisis. Esto se consigue, sin más que darle al horno una inclinación ajustable de unos  $30^\circ$  respecto al plano horizontal, situando un regulador de tiro en cada boca del horno.

El proceso de recocido es más bien crítico, y como cada composición exige su propio método de tratamiento, será preciso normalmente disponer de varios hornos (generalmente tres) para conseguir un flujo de producción aceptable.

## 9. AJUSTE DE LAS RESISTENCIAS.

Hay un gran número de factores que intervienen en el valor final que presenta una resistencia impresa, por lo que normalmente, ésta debe ajustarse. Con un buen control de proceso pueden conseguirse tolerancias de 15% y, si bien hay fabricantes que dicen poder alcanzar un 10%, lo cierto es que sólo lo consiguen con un cuidado considerable y rendimientos reducidos. Hay varios métodos para realizar el ajuste y los discutiremos brevemente a continuación. Con ellos se llega a tolerancias del orden de hasta 0,5%. Como paralelamente al ajuste es necesario medir la resistencia, la maquinaria empleada suele realizar ambas cosas a la vez de modo que el ajuste se detiene automáticamente al obtener el valor deseado. Hay también máquinas muy complicadas que admiten una programación y efectúan el trabajo por sí solas.

### 9.1 AJUSTE POR ABRASION.

Consiste simplemente en usar un chorro de arena para reducir el tamaño de la resistencia, quedando los perfiles como los ya vistos al hablar del trazado. Es barato y el más comúnmente empleado, aunque el ajuste es "unidireccional" porque solo permite subir el valor de la resistencia.

### 9.2 AJUSTE POR RAYADO.

Puede usarse, como variante de la abrasión, una herramienta con punta de diamante que se hace oscilar por medio de ultrasonidos, de modo que raspe zonas de la resistencia. Es un método relativamente limpio (no existe la arena abrasiva) y también relativamente barato; aunque el diamante se desgastará.

### 9.3. AJUSTE POR IMPULSOS.

Pueden emplearse impulsos de tensión para reducir el valor de una resistencia, gracias a la soldadura de partículas metálicas adyacentes. Si el impulso es largo, puede producirse también una subida del



valor de la resistencia al quemar caminos de contacto. A pesar de que este método es "bidireccional", se usa poco ya que es caro, se ve afectado por la reología del material y, además las resistencias así tratadas tienen una gran tendencia a la deriva con el tiempo.

#### 9.4 AJUSTE POR LASER.

Como método de gran exactitud, fiabilidad y muy rápido, puede emplearse el laser; bien para recocer el material o para vaporizarlo, con lo que el ajuste puede realizarse en las dos direcciones. Es un método caro por sus múltiples problemas. Entre ellos, está el hecho de que el rayo laser puede dañar el ojo. Para evitarlo, se usan sistemas de televisión en circuito cerrado en el ajuste. (Aunque así se protege el ojo no por eso se acaban los problemas, ya que deben tomarse precauciones especiales para proteger el tubo de la cámara de televisión).

### 10. MONTAJE DE COMPONENTES DISCRETOS.

#### 10.1 SOLDADURA Sn-Pb.

Ya se ha dicho que pueden incorporarse al circuito elementos realizados aparte en forma discreta; tales como resistencias, condensadores, inductancias, diodos y transistores, circuitos integrados monolíticos, etc. Si estos componentes se encuentran ya encapsulados de por sí, lo cual puede representar ventajas en orden a una eventual sustitución, el montaje se realiza por medio de una soldadura clásica. El método consiste, en general, en estañar por un lado el circuito (la red de conductores) y por los terminales de los componentes a añadir. Luego se calientan ambos a una temperatura de hasta 500°C por un tiempo que va desde 0,1 a 3,5 segundos, y la soldadura queda efectuada sin añadir más estaño adicional. Normalmente, se utiliza la proporción 60-40 de Sn-Pb aunque pueden emplearse otras. Para realizar el estañado del circuito se somete a éste previamente a un pulido seguido de una escrupulosa limpieza. La maquinaria y técnicas son muy parecidas a los empleados en los circuitos impresos clásicos. Para la soldadura propiamente dicha, se precisa ayuda óptica en forma de microscopio estereó de unos 10 aumentos, preferiblemente con zoom. Por razones de economía así como de fiabilidad y de menor área ocupada, muchos componentes añadidos, y sobre todo los semiconductores, se montan en forma de chip. Los métodos de montaje son muy parecidos a los empleados por sus fabricantes para el encapsulado de los mismos. Trataremos a continuación estos métodos.

#### 10.2 SOLDADURA EUTECTICA.

El problema más serio en este caso es, que la temperatura utilizada mantenida durante el tiempo necesario para la soldadura, tiene una gran influencia sobre la mayoría de los dispositivos "chip". El silicio se suelda bien si el sustrato hay oro en la cantidad suficiente. El proceso se realiza mediante técnicas que calientan el sustrato entero a una temperatura eutéctica. Con esto se logra mantener los chips ya soldados, a una temperatura inferior a la eutéctica necesaria para las sucesivas soldaduras. La alta temperatura utilizada hace que sea conveniente una atmósfera de nitrógeno para prevenir la oxidación.

#### 10.3 SOLDADURA POR ALEACION.

Para conseguir temperaturas inferiores pueden emplearse aleaciones oro-germanio, oro-estaño e incluso estaño-plomo. Con ello se consigue no sólo una más baja temperatura sino también el mantenimiento durante un menor tiempo.

Existen en el mercado resinas epoxy que son conductoras ya que están cargadas con partículas de oro o plata. El problema en este caso, consiste en la gran dificultad en aplicar la resina, que exige un gran conocimiento práctico además, de que los procesos de mezcla y endurecimiento son críticos. También puede ocurrir que se desprenda hidrógeno. Dentro de la categoría de los pegamentos, pueden citarse las cintas adhesivas tales como el teflón y otras. El uso de estas cintas implica temperaturas de 200°C y el conexionado eléctrico debe realizarse por separado. Pueden ocasionar problemas de conductividad térmica.

### 10.5 MONTAJE FLIP-CHIP.

Este tipo de montaje se caracteriza porque el chip está sujeto por sus interconexiones activas. En este caso el flujo de calor se realiza por estas conexiones, que consisten en unos pilares formados generalmente por evaporación al vacío, sea en el chip sea en el sustrato. Las soldaduras se realizan por medio de alguno de los procedimientos aquí descritos. Los principales problemas que se presentan, derivan de la necesidad de una correcta disposición del chip para realizar las soldaduras. Además para controlar los puntos de soldadura debe emplearse un microscopio de infrarrojos ya que no son directamente accesibles.

### 10.6 SOLDADURA POR TERMOCOMPRESION.

Es un buen procedimiento para realizar soldaduras en conductores de oro.

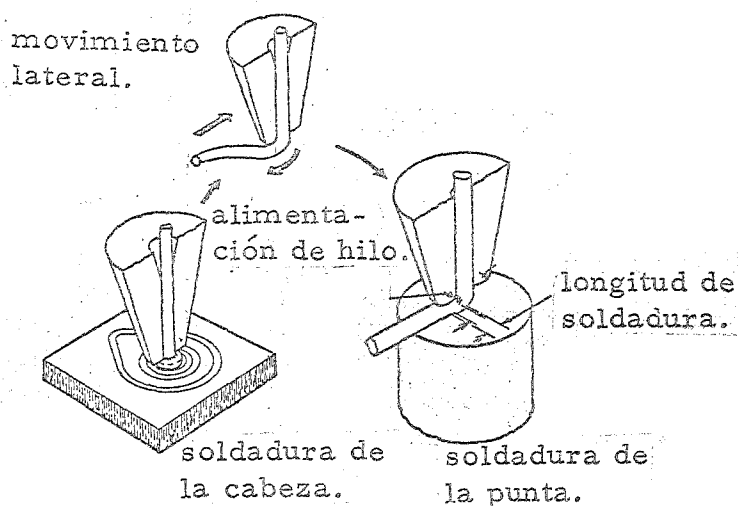


Fig. 10.1 Soldadura por termocompresión.

Se utiliza para ello oro recocido de alta pureza (hasta 99,999%) en forma de hilos de 0,001 pulgadas de diámetro. Este hilo atraviesa una punta capilar que aplasta la punta de hilo contra el punto a soldar, tal como indica la figura 10.1. El proceso se realiza manteniendo este punto y el hilo a una alta temperatura (unos 300°C). Si el circuito integrado tiene metalizaciones de aluminio, se usa este material para efectuar la soldadura, ya que así se evitan los componentes intermetálicos aluminio oro, que se formarían en la termocompresión con hilo de oro. Como el alu-

minio se oxida superficialmente, se hace necesario deshacer esta película de óxido mediante ultrasonidos y aportando la energía necesaria.

### 10.7 SOLDADURA POR ULTRASONIDOS.

La soldadura por termocompresión puede ocasionar problemas al mantener los chips a altas temperaturas, por ello, y sobre todo en el montaje de un gran número de componentes, se tiende a trabajar a temperatura ambiente. Esta necesidad ha hecho popular el uso de soldadura por ultrasonidos, en la que el calor se produce mediante un impulso de energía en el que se controla cuidadosamente la potencia y el tiempo necesario. Se usa hilo de aluminio con un 1% de magnesio o silicio añadido.

(menos generalmente, oro) en la misma forma que la termocompresión.

## 11. PRUEBAS.

Una vez finalizado el montaje y soldadura de los componentes debe comprobarse que se cumple las especificaciones eléctricas del circuito. Para ello es necesario efectuar contacto con los terminales - de entrada y salida, lo cual se realiza (dado su tamaño) con ayuda óptica y mecánica. Los equipos empleados, son similares a los usados en la prueba de transistores y circuitos integrados monolíticos, si bien los empleados aquí, tienen unos requisitos de movilidad de las puntas de - prueba, que los diferencian algo de aquellos.

Como dato práctico puede mencionarse que estos equipos admiten hasta unos 30 terminales de prueba alrededor de un pequeño substrato.

## 12. ENCAPSULADO.

Los circuitos híbridos ya terminados se presentan en diferentes formas. Se usan capsulas similares a las de los transistores y circuitos integrados monolíticos, esto es, redondas o planas, así como encapsulados plásticos de geometría variable según el molde utilizado. También pueden aplicarse recubrimientos cerámicos al circuito en sí, de tal modo que el aspecto exterior es el del substrato. Como materiales - para realizar estos procesos se usan plásticos (pueden producir problemas en orden a las temperaturas y presiones necesarias para encapsular) y resinas de diversos tipos. Las resinas epoxy se utilizan a veces mezcladas con alúmina u otros polvos metálicos cuando se precisa una alta transferencia de calor. De todas formas las epoxy presentan varios inconvenientes; tales como reacciones exotérmicas y tensiones internas durante el secado. También pueden producir deriva en las resistencias. Mas caros que los encapsulados plásticos son las cerámicas aunque de mayor hermeticidad y fiabilidad. Existe actualmente un procedimiento serigráfico de encapsulación, con un espesor de 0,001 pulgadas. Otro método ampliamente utilizado consiste en soldar (con Sn-Pb) una cápsula metálica de Fe-Ni-Co a una metalización del substrato. Los terminales de entrada y salida atraviesan en este caso la alúmina a través de perlas de vidrio. Para conseguir la máxima hermeticidad y fiabilidad, la soldadura de la cápsula se realiza en máquinas con atmósfera inerte y con aleaciones de estaño-oro, excluyéndose por completo los fundentes. A veces también se usa soldadura eléctrica. La tabla 12.1 proporciona información sobre diversas resinas y la 5 condiciones a cumplir por el encapsulado hermético, según la norma MIL Std.

T A B L A 12.1

Características de resinas

<u>PROPIEDAD</u>	<u>EPOXY</u>	<u>FENOLICA</u>	<u>DIALFTALATO</u>
Temperatura de moldeo °C	150	150	150
Dilatación térmica °C <sup>-1</sup>	25-35	25-35	25
Absorción de agua en 24h. %	0,05	0,3	0,3
Constante dieléctrica	4	5	5
Factor de disipación %	1	1	0,5
Temperatura de uso máximo °C	175	125	200

## T A B L A 12.2

## Especificaciones del encapsulado hermético

<u>PRUEBA</u>	<u>REFERENCIA A MIL Std</u>	<u>CONDICIONES ESPECIFICAS</u>
Hermeticidad	Mil Std-202C método 112 condición C, procedimiento 1.	$1 \times 10^{-8}$ cm <sup>3</sup> /seg de He
Resistencia de terminales (tracción)	Mil Std 750 A método 2036 condición de prueba A.	1,5 libras de carga mínimas.
Resistencias de terminales (fatiga)	Mil Std 750 A método condición de prueba E	3 ciclos de dobleces 90° con una carga de 407.
Choque térmico	Mil Std 202C método 107B condición de pruebas C.	- 65a + 200°C a 5Hz.
Soldabilidad chapado (oro de 24 k)	Mil Std 202C método 208	Cobertura mínima 94% 425°C (aire) por 5 minutos.

13. REQUISITOS DE LIMPIEZA.

Durante la fabricación de los circuitos híbridos debe mantenerse una escrupulosa limpieza. Específicamente antes de la impresión, de la soldadura y del encapsulado, se realizan procesos de limpieza. - Además de esto, el local donde se manejen los sustratos debe tener aire filtrado y con ligera sobrepresión para evitar la entrada de polvo. La humedad relativa también se vigila pues la alta resistividad de la alúmina puede ocasionar problemas de electricidad estática en ambiente muy secos. Ya que la principal causa de contaminación son las huellas de dedos, debe hacerse todo lo posible para que no se produzcan, mejor que confiar se en su desaparición con la limpieza (Usense guantes, pinzas, etc.). - Una buena limpieza supone el tratamiento con disolventes adecuados en forma líquida y ultrasonidos, seguido de una limpieza al vapor lo cual asegura que al sustrato solo le llega el disolvente puro, sin contaminantes solubles, partículas extrañas, etc. Como disolventes se usan tricloretileno, metanol y otros. Los ultrasonidos se aplican en tanques de una capacidad comprendida entre 3 y 100 litros, con potencias del orden de 25 a 30 vatios/litro. Para efectuar una desionización de los sustratos, se les puede someter a un lavado en agua desionizada (de resistividad comprendida entre 15 y  $18 \times 10^6$  ohmios-cm).

Este agua debe purificarse en circuitos cerrados para que quede libre de partículas extrañas, sustancias orgánicas, baterías, etc.

14. CONSIDERACIONES ECONOMICAS.

Una vez efectuado el diseño del circuito híbrido, es necesario, antes de fabricarlo, efectuar una apreciación del coste a que resultará. Para ello será necesario tener en cuenta los componentes del coste relativos a

- 1) Materiales (sustratos, composiciones, componentes añadidos, etc.)
- 2) Valor de cada operación efectuada (preparación de sustratos y composiciones, horneado, etc.).

- 3) Amortización del equipo empleado.
- 4) Interés de la inversión efectuada.
- 5) Gastos de diseño.
- 6) Demás gastos fijos imputables.

La mayor dificultad para obtener estos costes, estriba en que el rendimiento de la fabricación no es nunca el 100%, habiendo un - buen porcentaje de rechazos. Hasta la fase de montaje de los "chip", el rendimiento puede ser del 70 o el 80%, en el montaje de cada "chip" las pérdidas pueden ser del 5 al 10%. Según esto un circuito que tenga ocho chips se puede obtener con éxito, solamente en un 30 a 50% de los intentos.

Como se ve los costes, según lo anterior, son dos a tres veces los teóricos. Esta es la causa de grandes fracasos industriales, y lo que justifica un elevado control de calidad y de procesos, para - que elevando el rendimiento de cada operación individual, pueda conseguirse un aceptable rendimiento total.

Por todo lo dicho algunos fabricantes suelen montar los - componentes añadidos con encapsulado precio, para mantener altos rendimientos, y solo después de una gran experiencia se emplean "chips".

A la vista de las consideraciones económicas, puede ser - necesario rediseñar todo o parte del circuito híbrido. Específicamente deben considerarse los siguientes puntos:

- 1) Sustituir componentes impresos, por componentes discretos o viceversa.
- 2) Cambio de los materiales de la composición de resistores o condensadores, atendiendo a su dimensionado.
- 3) Cambio en el número de operaciones de la impresión.
- 4) Cambio en el ancho del módulo elegido.
- 5) Uso de otros tipos de encapsulado y métodos de montaje e interconexión de los conductores.
- 6) Rediseñar el trazado del circuito, para evitar cruces de conexiones, evitar en lo posible las corrientes de retorno por tierra, etc.
- 7) Revisar las dimensiones de los componentes y su situación en el sustrato para evitar concentraciones de calor en algún punto.

Estas consideraciones son de tipo económico-técnico, pero contribuyen a elevar el rendimiento.

Para dar una primera idea de precios en este tipo de tecnología, a continuación se incluye un estudio de una línea genérica de producción capaz de producir 1.000.000 de circuitos al año.

Coste de la línea de producción.

3 Impresoras .....	2.280.000
2 Secadoras .....	76.000
2 Hornos de correa .....	3.000.000
1 Equipo de soldadura .....	228.000

10 Pantallas .....	12.000
1 Viscosímetro .....	57.000
1 Medidor de espesores.	570.000
	<hr/>
	6.223.000

#### Amortización.

Se la puede considerar a cinco años, por lo que resultará una tasa anual de 1.244.000 pesetas.

#### Interés del capital invertido.

Considerando ser el tipo de interés de un 8% anualmente, y por este concepto se tiene un coste de 497.000 pesetas.

#### Coste por circuito.

Substrato (1 "xl") .....	2,66
Composiciones .....	1,90
Mano de obra .....	0,57
Amortización .....	1,24
-Interés de capital .....	0,50
Encapsulado .....	1,14
	<hr/>

Total ..... 8,02 pts/substrato.

En un substrato de una pulgada cuadrada pueden acomodarse un promedio de 12 a 15 resistencias interconectadas. Suponiendo 12 resis<sup>u</sup>tencias, el coste es de 0,67 pts/resistencia.

Además será interesante valorar la posible economía total del circuito híbrido, computando las ventajas de menor espacio, mayor - fiabilidad, ahorro de encapsulados en componentes discretos, moduliza-- ción, etc.

#### 15. BIBLIOGRAFIA.

Product literature. E.I. Du Pont de Nemours & Co.

Prodeedings of the IEEE octubre 1.971.

Reference Data for Radio Engineers. Howard W. Sams & Co.

Handbook of Materials and Processes for Electronics. Charles a Harper Ed. Mc. Graw Hill.

Hybrid Microelectronics Circuits. Richard A. Rikoski. Ed. Harper.

T A B L A  
PROPIEDADES DE LAS CERAMICAS

PROPIEDAD (1)	Esterita.	Alúmina.			Berilia
		Alsimag 576	Alsimag 771	Alsimag	Alsimag 754
Peso específico	2,7	3,4	3,62	3,7	2,88
Temperatura máxima en régimen continuo.	1000	1100	1500	1550	1500
Dureza Mos	7,5	9	9	9	9
Dureza Rockwell 45N	-	69	77	78	65
Coefficiente de dilatación lineal.					
25-300°C	6,9	6,5	6,0	6,4	6,0
25-700°C	7,8	7,5	7,2	7,5	7,5
25-900°C	8,0	7,2	7,4	7,9	8,5
Resistencia a la tracción en Kg/cm <sup>2</sup>	700	1400	1400	1760	- - -
Resistencia a la compresión en kg/cm <sup>2</sup> .	6330	19330	22150	26360	13000
Resistencia la flexión en kg/cm <sup>2</sup> .	1470	2460	3090	3230	1760
Resistencia al impacto (Kgm)	0,058	0,073	0,075	0,081	- - -
Conductividad térmica en cal. cm/seg cm <sup>2</sup> °C					
a 100°C	0,014	0,050	0,066	0,084	0,55
200°C	0,010	0,024	0,034	0,041	0,28
300°C	0,009	0,018	0,024	0,026	0,17
400°C	- -	0,012	0,016	0,020	0,08
Rigidez dieléctrica a 50 Hz en kv/mm, con disco - de 1/4 de pulgado de ancho.	9,1	7,9	8,3	8,3	8,9
Resistividad volumétrica en ohm-cm (X 10 <sup>9</sup> )					
a 25°C	100000	100000	100000	100000	100000
100°C	100000	120000	170000	120000	100000
300°C	140	50	44	11	100000
500°C	0,3	0,1	0,25	0,073	10000
700°C	0,005	0,003	0,007	0,0035	100
900°C	0,0008	0,0004	0,0007	0,0007	3
Valor Te (7)	870	800	840	840	1400
Notas	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

NOTAS.

- (1) Las medidas son valores medios que pueden variar algo con tamaños, - métodos de fabricación, etc.
- (2) Las esterita indica, es de bajas pérdidas dieléctricas.
- (3) La alúmina 576 es una variedad económica, de alta resistencia y con buenas características mecánicas y eléctricas (85%) de alúmina).

- (4) Buena eléctrica y mecánicamente. Se metaliza fácilmente. Posee un 94% de alúmina.
- (5) Alúmina de alta resistencia mecánica y bajas pérdidas eléctricas, conteniendo un 96% de alúmina.
- (6) Es una cerámica con un 99,5% de berilia (óxido de berilio), que posee excelentes características eléctricas, y que se usa para aplicaciones que exigen gran disipación de calor.
- (7)  $T_c$  es la temperatura a la que la resistividad es de  $10^6$  ohm-cm.